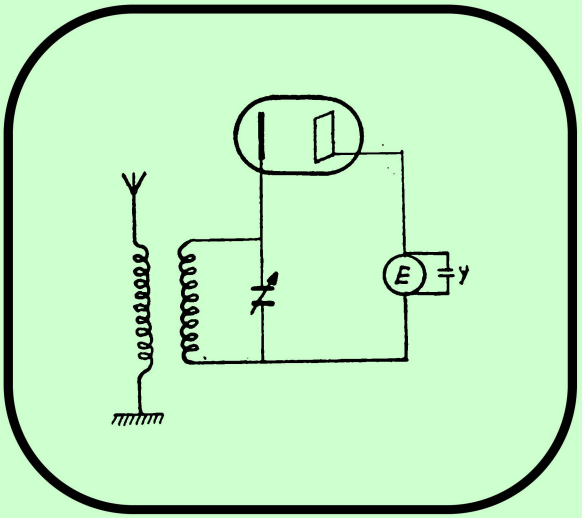
Cours de transmissions
- Volume 01 -

ELEMENT DE RADIO-ELECTRICITE



Novembre 1950

AVERTISSEMENT

La présente notice ne doit pas être considérée comme un cours complet de radioélectricité. Elle a seulement pour objet de faire connaître à l'élève d'une façon simple et purement descriptive l'essentiel des phénomènes qui sont à la base de la radioélectricité, phénomènes mis en jeu dans les postes de radiocommunications, organes essentiels des transmissions militaires modernes.

Il a paru opportun de la faire précéder d'un préambule donnant un aperçu sur quelques notions très générales.

Son chapitre premier est consacré à un bref rappel de quelques notions d'électricité qu'il est essentiel de posséder avant d'aborder l'étude de la radioélectricité.

En fin de notice une note bibliographique donne les titres de quelques ouvrages dans lesquels l'élève pourra trouver une étude plus approfondie des sujets traités.

SOMMAIRE

		Pages
Préambule		5
CHAPITRE I.	— Rappel de notions d'électricité. — Tableau des symboles et abréviations	9
CHAPITRE II.	— Principe des radiocommunications.	15
CHAPITRE III.	— Le circuit oscillant — Couplage de circuits — Résonance.	21
CHAPITRE IV.	— Les tubes à vide.	25
CHAPITRE V.	— Amplification.	37
CHAPITRE VI.	— Oscillateurs.	43
CHAPITRE VII.	— Modulation.	47
CHAPITRE VIII.	— Détection.	51
CHAPITRE IX.	— Constitution d'ensemble d'un récepteur.	57
CHAPITRE X.	— Constitution d'ensemble d'un émetteur simple.	61
Note bibliographique.		64

PRÉAMBULE

L'ATOME

L'atome est la plus petite particule d'un élément qui puisse exister de façon indépendante en conservant l'intégrité de ses propriétés.

L'atome comporte :

— un *noyau* pesant,

— un certain nombre d'*électrons*, particules élémentaires d'électricité négative, gravitant autour de ce noyau.

A) Le noyau de l'atome est formé :

— d'un certain nombre de *protons*, particules pesantes chargées d'électricité positive, chaque proton portant une charge élémentaire e = $1{,}6 \times 10^{-19}$ coulomb.
Le nombre de protons porté par leur noyau caractérise tous les éléments, allant de 1 pour l'hydrogène, le plus léger, le premier (en grec : protos) de tous les éléments, à 92 pour l'uranium, le plus lourd (classification de Mendeleef). Ce nombre est appelé *nombre atomique ;*

— d'un certain nombre de *neutrons*, particules pesantes de même masse que les protons mais dépourvues de charge électrique.
La présence de neutrons dans le noyau rend compte de la différence existant entre le nombre atomique d'un élément et sa *masse atomique* mesurée par les chimistes. Seul le noyau de l'atome d'hydrogène ne comporte pas de neutron.
La masse atomique A = Z protons + N neutrons.
La masse de l'atome est donc concentrée dans son noyau.

B) Les électrons gravitant autour du noyau sont des particules élémentaires d'électricité négative de charge e = — $1{,}6 \times 10^{-19}$ coulomb, donc de même valeur que celle portée par le proton mais de signe contraire. Leur masse, très faible, m = $9{,}1 \times 10^{-28}$ gramme est de nature électromagnétique.
L'électron est 1840 fois plus léger que le plus petit noyau, celui d'hydrogène. Son diamètre est 100 000 fois plus petit que celui de l'atome.

— Les électrons sont normalement en nombre égal à celui des protons du noyau, si bien que l'ensemble de l'atome est électriquement neutre dans les conditions normales, portant Z protons et Z électrons.

— Les électrons gravitent autour du noyau animés d'une très grande vitesse, de l'ordre de 20 000 kilomètres/seconde, sur une ou plusieurs orbites, appelées également des « niveaux », que l'on peut se représenter par des sphères ou des ellipsoïdes ; leur nombre a été rigoureusement déterminé pour chaque élément ainsi que celui des électrons que chacune peut porter.

— La couche la plus extérieure d'un atome n'est stable que si elle comporte 8 électrons.
Dans un atome comme celui du sodium, ne portant à sa périphérie qu'un seul électron, celui-ci, constituant une couche instable, pourra facilement quitter l'atome pour donner un *ion négatif*.
L'atome ayant perdu une charge négative n'est plus en équilibre et devient un *ion positif*.
L'ion négatif peut également être un atome qui a capté un électron supplémentaire.

— Lorsque deux atome se partagent un même électron, l'ensemble constitue une *molécule*.

— Le nombre d'électrons que l'atome d'un élément peut partager avec un autre exprime sa *valence chimique.*

Les atomes de quelques éléments légers ont été représentés schématiquement sur la figure 1.

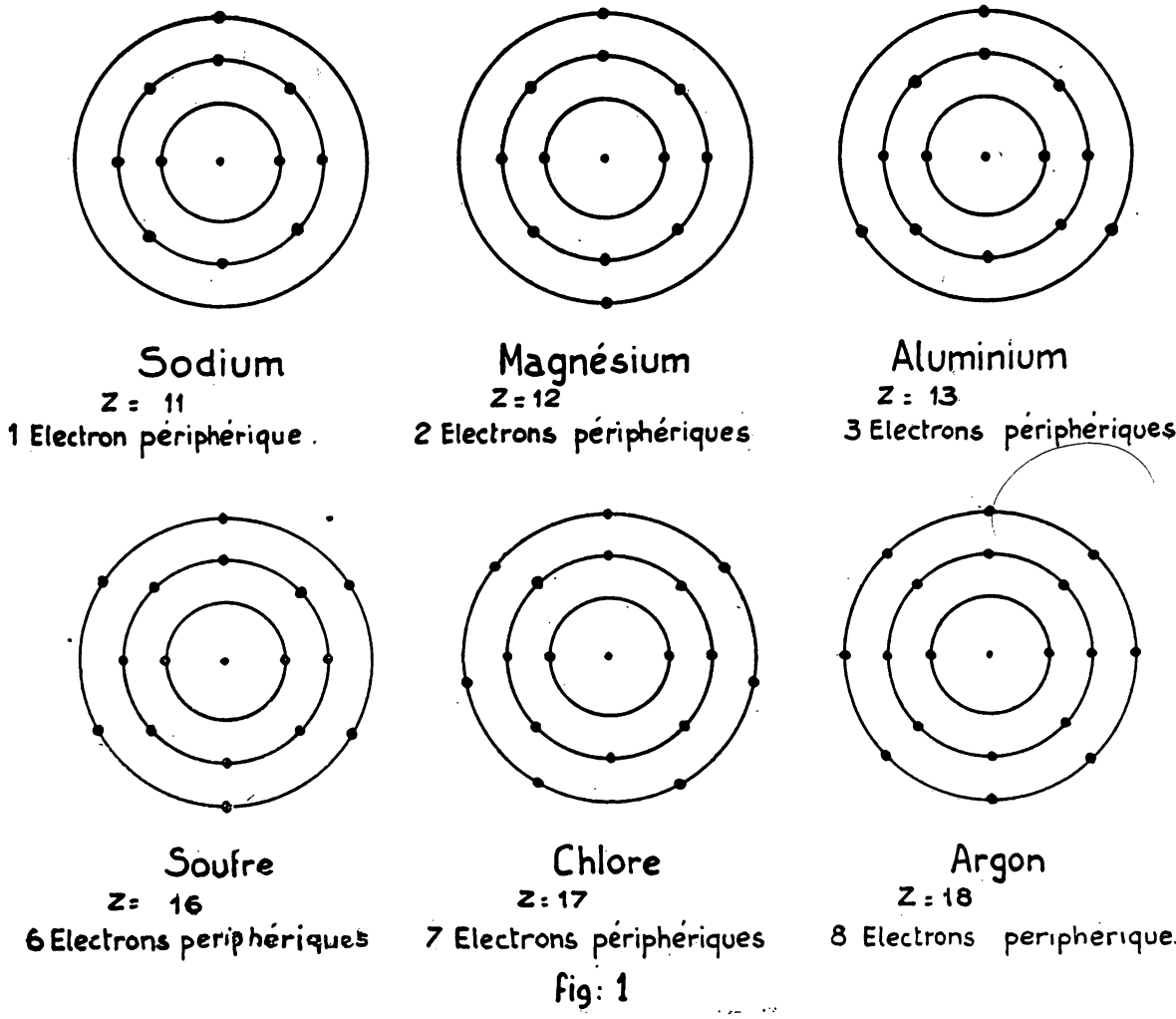


fig: 1

— L'argon dont l'atome comporte 8 électrons périphériques est un élément inerte : sa couche extérieure est stable avec ses huit électrons : l'argon n'entrera dans aucune combinaison chimique. Il en est ainsi de tous les gaz rares.

CORPS CONDUCTEURS

Dans un corps comme le sodium, l'unique électron se trouvant sur l'orbite extérieure de l'atome constitue une couche instable, l'action attractive du noyau sur cet électron étant en partie compensée par l'action répulsive exercée par les électrons de la couche précédente ; cet électron pourra facilement quitter l'atome, devenant alors un « électron libre », pour se rendre sur un autre atome ayant déjà perdu son électron. Le sodium est un *corps conducteur.* Les métaux, comportant tous 1, 2, 3 ou 4 électrons au maximum sur l'orbite extérieure, sont des conducteurs. Leurs électrons libres se déplacent d'un atome à l'autre d'une façon tout à fait désordonnée.

On conçoit aisément, comme nous le verrons plus loin, qu'en soumettant un fil métallique à un champ électrique en disposant à ses extrémités des charges électriques de signe contraire, on arrivera à créer un mouvement d'ensemble de ses électrons libres : ce sera le courant électrique.

CORPS ISOLANTS (DIELECTRIQUES)

Dans les corps comme le soufre ou le chlore, comportant plus de quatre électrons sur l'orbite extérieure, l'électron que l'on tenterait d'arracher s'écarte de sa position d'équilibre, mais il est sollicité par une force élastique qui tend à le ramener à sa position initiale. L'électron ne peut plus être enlevé à l'atome auquel il appartient (à moins d'employer des moyens incomparablement plus énergiques). Ces corps sont dits *isolants*.

Remarque. — Dans les corps composés qui, comme le verre ou la porcelaine, contiennent en combinaisons chimiques des métaux comme le sodium, le magnésium ou l'aluminium, les atomes de ces métaux sont pris dans les combinaisons chimiques : les électrons de leur orbite externe, au lieu d'être libres, sont emprisonnés dans les molécules. Ceci explique pourquoi ces substances sont isolantes malgré la présence de métaux dans leur sein.

RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE

Comme nous venons de le voir, les phénomènes électriques que nous observons sont dus aux déplacements des charges électriques portées par les électrons périphériques de l'atome.

Mais si l'on fait subir à des électrons des accélérations brusques ou qu'au contraire on les freine, ils émettent un « rayonnement électromagnétique ». Ce rayonnement apparaît comme une libération d'énergie par la matière grâce à l'inertie de l'électron.

Si un atome a été porté à un nivau d'énergie W_2 supérieur à son niveau initial W_1 par une excitation quelconque (choc électronique), lors du retour au niveau initial ses électrons restituent l'énergie absorbée et ceci sous forme de rayonnement de fréquence f telle que $W_2 - W_1 = hf$ où h est la constante de Planek : $h = 6{,}6 \times 10^{-27}$ c. g. s. L'échange d'énergie entre la matière et le rayonnement se fait par nombre entier de hf, appelés *quanta* d'énergie ou *photons*.

Les électrons de toutes les couches de l'atome peuvent participer à cette émission.

Par contre, dans le processus inverse de l'effet photoélectrique, un rayonnement de fréquence f arrache des électrons aux atomes du corps qu'il frappe ; il communique à ces électrons une énergie $W = hf = 1/2\ m\ v^2$, v étant la vitesse prise par l'électron arraché.

Pour un métal donné, l'effet photoélectrique ne se produit que si f est supérieure à une valeur seuil fo. Si la fréquence du rayonnement est supérieure à fo, l'effet photoélectrique se produit, si faible que soit l'intensité du rayonnement : il suffit qu'il arrive une quantité hf, quantum de rayonnement, photon ou grain de lumière.

Le photon est un corpuscule, non pas au sens de grain matériel, mais en ce qu'il est une unité physique, un phénomène qui peut se manifester ponctuellement avec la totalité de son énergie.

A chaque fréquence f de rayonnement correspond un photon d'énergie hf.

Il ressort de cet exposé que le photon est défini à la fois comme une oscillation de fréquence f et comme un corpuscule.

Il ne s'agit pas, bien entendu, d'un corpuscule qui oscille. La mécanique ondulatoire définit les deux propriétés onde et corpuscule comme deux aspects complémentaires du phénomène. L'on peut dire que le rayonnement sous son aspect oscillatoire est une énergie potentielle dans une certaine région de l'espace. L'onde n'indique alors que la probabilité de localisation de l'énergie en tel ou tel point. Au contraire, le corpuscule est le phénomène observé lors de la localisation de cette énergie en un point (par exemple, effet photoélectrique, impression lumineuse sur la rétine etc.).

L'onde et le corpuscule ne sont pas observables simultanément.

Cette théorie fait la synthèse de celles qui l'ont précédée, l'une due à Newton (émission), l'autre due à Fresnel (oscillations). Elle permet de rendre compte des phénomènes que chacune expliquait, l'effet photoélectrique pour l'émission de Newton et les interférences pour les oscillations de Fresnel.

Il n'y a pas lieu d'insister sur cette hypothèse, mais il est indispensable d'en connaître l'existence ; en effet, elle prend place parmi les notions essentielles qu'il importe d'avoir sur le monde physique.

CLASSIFICATION DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES

Mode de génération	Nature	Qualification	Longueurs d'ondes (Valeurs moyennes)	Fréquences en hertz (Valeurs moyennes)	Mode d'observation
Courants électriques variables.	Ondes hertziennes	Très grandes	10 000 m	150 000	Récepteurs de T. S. F.
		Grandes	2 000 m	30 000	
		Moyennes	300 m	10^6	
		Petites	50 m	6×10^6	
		Très petites	3 m	10^8	
			3 cm	10^{10}	
Corps portés à température élevée et tubes spéciaux.	Ondes infra-rouges	Longues	0,3 mm	10^{12}	Thermomètres sensibles.
		Courtes	1 μ	3×10^{14}	
	Ondes lumineuses	Rouge	0,8 μ	$3{,}75 \times 10^{14}$	OEil.
		Vert	0,5 μ	6×10^{14}	
		Violet	0,4 μ	$7{,}5 \times 10^{14}$	
	Ondes ultra-violettes	Longues	0,2 μ	$1{,}5 \times 10^{15}$	Ecrans fluorescents et plaques photographiques.
		Courtes	0,02 μ	$1{,}5 \times 10^{16}$	
Tubes spéciaux.	Rayons X	Très mous	20 A°	$1{,}5 \times 10^{17}$	
		Mous	1 A°	3×10^{18}	
		Moyens	0,3 A°	10^{19}	
		Durs	0,03 A°	10^{20}	
Désintégration du radium et des corps radioactifs.	Rayons γ	Moyens	0,01 A°	3×10^{20}	

μ : micron $= \frac{1}{1\,000}$ mm

A° : angström $= \frac{1}{10\,000}$ μ

CHAPITRE I

RAPPEL DE NOTIONS D'ELECTRICITE

CHAMP ELECTRIQUE

Soit une charge électrique isolée *e*. Elle crée autour d'elle un *champ électrique* susceptible de se manifester par une force exercée sur toute charge électrique y pénétrant.

Si nous disposons à proximité de *e* une charge électrique *e'* de même signe (figure 2), celles-ci se repoussent avec une force *f* donnée par la formule bien connue $f = \frac{e\,e'}{r^2}$, r exprimant la distance qui sépare les deux charges.

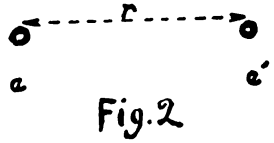


Fig.2

Autour de chaque charge (*e* ou *e'*) existe un champ électrique qui, en un point *M* situé à une distance *r*, est : $E = \frac{e}{r^2}$ (figure 3).

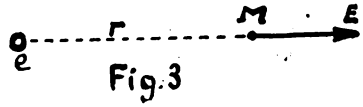


Fig.3

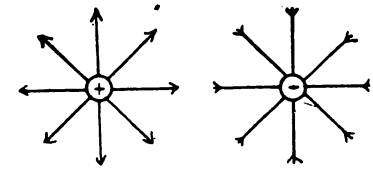


Fig 4.

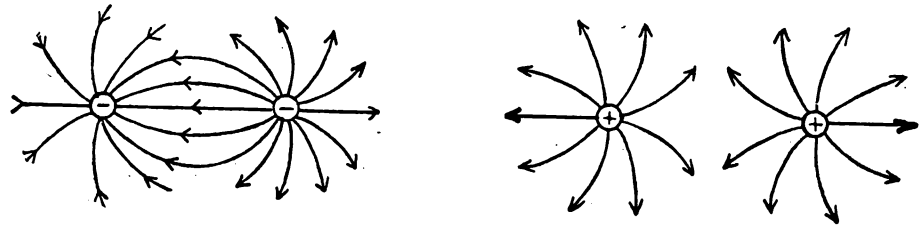


Fig. 5

Les lignes de force représentant le champ d'une charge unique sont des rayons partant dans toutes les directions (figure 4).

La figure 5 représente les lignes de force de deux charges voisines.

CHAMP MAGNETIQUE

Lorsqu'une charge électrique se déplace, apparaît une autre propriété : le *champ magnétique.*

L'électron e (figure 6) produit en un point P un champ électrique E dirigé selon Pe ; l'électron se déplace à une vitesse v. Il produit en P un champ magnétique H, perpendiculaire à E et ayant pour valeur $H = \frac{ev \sin \alpha}{r^2}$.

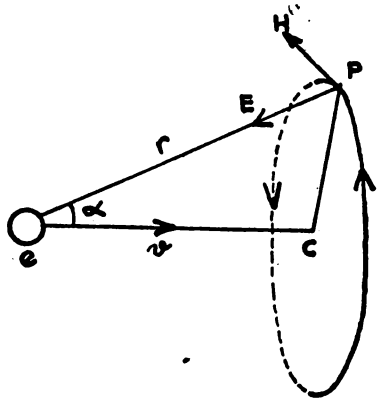


Fig . 6

Le champ magnétique de l'électron en mouvement est donc proportionnel d'une part à sa charge d'autre part à sa vitesse.

Le phénomène est symétrique par rapport à ec : les lignes de force sont des circonférences.

— De même (fig. 7), un champ magnétique exerce une action sur une particule électrique e animée d'une vitesse v. Peu importe comment est produit ce champ H, que ce soit par une masse magnétique (aimant) ou par une particule en mouvement, par une circulation de particules (courant).

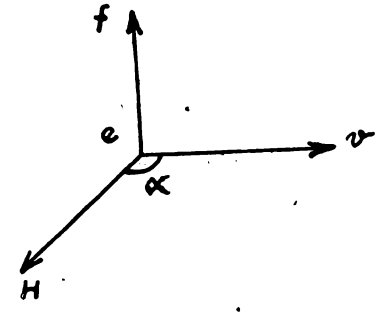


Fig . 7

La particule e est soumise à une force f, perpendiculaire au plan vH et a pour grandeur :

$f = evH \sin \alpha$.

COURANT ELECTRIQUE DANS UN CONDUCTEUR

Pour créer et entretenir dans un fil conducteur AB une migration dirigée d'électrons, un courant électrique, il faut maintenir dans le fil un champ électrique E grâce à une source de courant (figure 8).

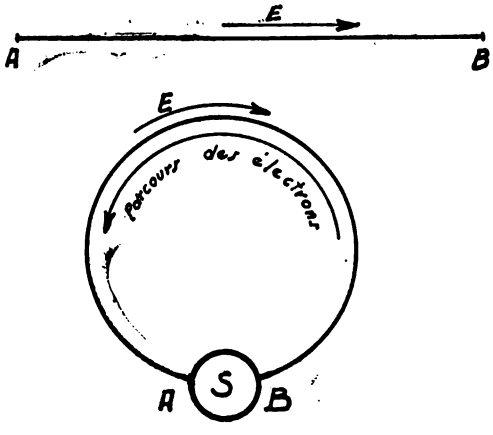


Fig . 8

Celle-ci maintient entre A et B la différence de potentiel nécessaire.

Pour une particule électrique de charge e parcourant le circuit dans le champ E, il faut produire en S une différence de potentiel $V = E \times (AB)$.

La particule fournit un travail eV.

Le mouvement des électrons se fait en sens inverse du sens conventionnel choisi arbitrairement pour le courant électrique.

Sous l'action du champ E, chaque électron ne parcourt pas le conducteur de bout en bout : il ne fait que passer d'un atome à un atome voisin d'où à son tour un électron saute sur un autre et ainsi de suite. La vitesse de progression des électrons dans la direction du champ est faible, 36 mètres/seconde environ, mais le mouvement général (l'ébranlement) se propage à environ 300 000 kilomètres à la seconde : c'est la vitesse du courant électrique.

INDUCTION

Soit (figure 9) un circuit C placé dans un champ magnétique H. Il est traversé par un flux $\Phi = HS \cos \alpha$.

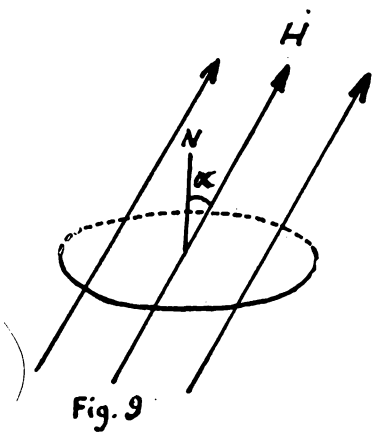


Fig. 9

Si on fait varier le flux, il apparaît dans le circuit C une force électromotrice, dite d'induction, dont le sens coïncide avec celui d'un courant dont le flux Φ' serait orienté de manière à s'opposer à la variation du flux Φ qui l'a fait naître.

Si Φ augmente Φ' tend à le diminuer. Si Φ décroît, Φ' tend à l'augmenter.

La force électromotrice d'induction e a pour valeur :

$$e = - K \frac{d\Phi}{dt}$$

On voit qu'elle est d'autant plus grande que la variation de flux est plus rapide.

Nous trouvons là dans le domaine électrique l'équivalent d'une chose que nous connaissons bien dans le domaine mécanique : l'inertie.

Les électrons placés dans un champ magnétique fixe par rapport à eux ne sont sollicités par aucune force. Faire varier le flux revient au même que d'accélérer les électrons dans un champ fixe. L'inertie au départ s'oppose à cette brusque accélération tout comme elle s'oppose au ralentissement lors du freinage.

COURANT ALTERNATIF

Si nous faisons tourner le circuit C dans le champ H autour d'un de ses diamètres (figure 10), nous faisons varier à chaque instant le flux qui le traverse $\Phi = HS \cos \alpha$.

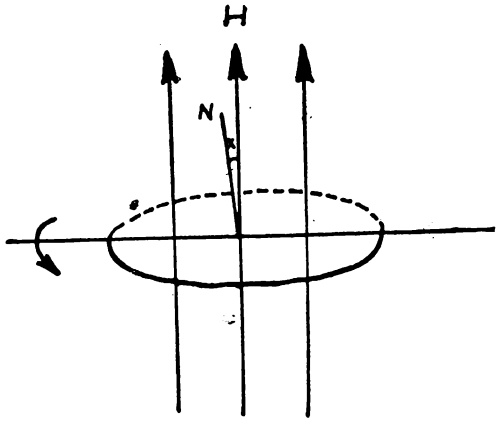


Fig. 10

Si la rotation se fait à vitesse angulaire constante ω, le flux est à chaque instant :
$\Phi = HS \cos \omega t$.

La force électromotrice d'induction devient :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = \omega HS \sin \omega t.$$

La force électromotrice d'induction a une forme alternative sinusoïdale (figure 11). Dans le circuit fermé C circule un courant alternatif.

$T = \frac{2\pi}{\omega}$ ou temps mis par le circuit pour faire un tour complet (2π radians) est *la période.*

$F = \frac{\omega}{2\pi}$ ou nombre de tours par seconde est la *fréquence.*

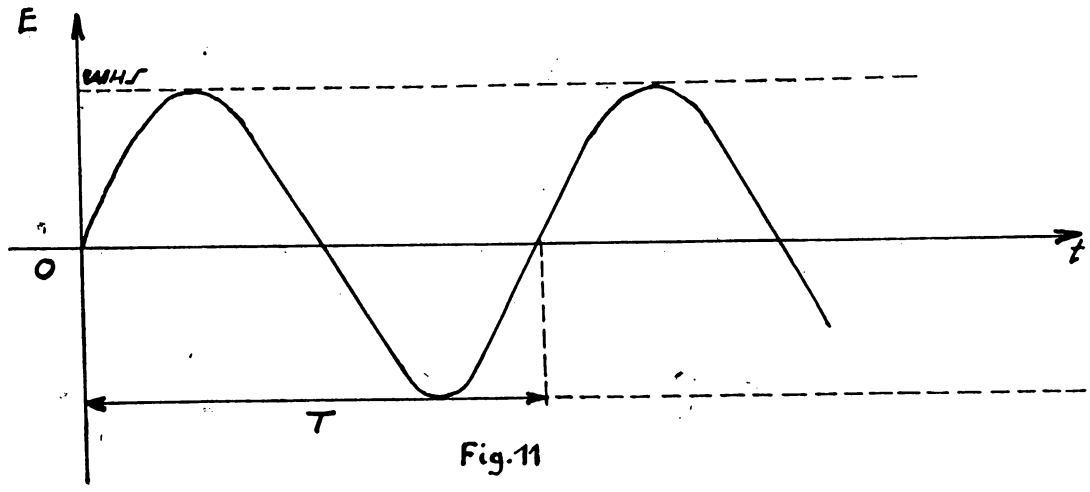


Fig.11

SELF-INDUCTION

On appelle effets de self-induction les effets d'induction qu'un courant électrique variable (produisant donc un champ magnétique variable) a sur son propre circuit.

Les phénomènes de self-induction sont soumis aux mêmes lois que ceux d'induction : la force électromotrice de self-induction s'oppose aux variations de courant dans un circuit et elle est d'autant plus importante que ces variations sont plus rapides.

C'est une nouvelle manifestation de l'inertie.

Un circuit ayant de la self-induction offre une certaine réactance au passage du courant alternatif $Z = L\,\omega$.

Celle-ci est d'autant plus grande que le coefficient de self-induction L du circuit est plus grand et la fréquence du courant plus élevée.

CAPACITE

L'ensemble constitué par deux surfaces métalliques en regard (armatures) séparées par un espace diélectrique constitue un *condensateur.*

S'il est connecté aux deux pôles d'une source de courant appliquant entre ses armatures une différence de potentiel V, il peut accumuler sous forme de charges électriques une certaine quantité d'électricité proportionnelle à V : $Q = C\,V$.

C mesure la *capacité* du condensateur. Elle est proportionnelle à la surface des armatures et inversement proportionnelle à la distance qui les sépare.

Elle dépend également de la nature du diélectrique.

— Si les armatures d'un condensateur qui a emmagasiné une certaine quantité d'électricité (condensateur chargé) sont réunies par un fil conducteur, elles y créent un champ électrique donnant naissance à un courant de décharge : les électrons en excès sur l'une des armatures se rendent sur l'autre jusqu'à égalisation des potentiels.

Si un condensateur est branché dans un circuit où circule un courant alternatif, il pourra se charger et se décharger au rythme de la tension alternative. Cela fait dire que le condensateur laisse passer le courant alternatif.

Le condensateur offre toutefois une certaine réactance au passage du courant :

$Z = \frac{1}{C\omega}$. Elle est d'autant plus faible que la capacité est plus grande et que la fréquence du courant est plus élevée.

CHAMP ELECTROMAGNETIQUE

D'après ce que nous venons de voir, le champ magnétique variable et le champ électrique variable sont inséparables l'un de l'autre : la production de l'un d'eux en un point de l'espace entraîne nécessairement l'apparition de l'autre. La synthèse de ces champs a été faite par Maxwell qui en a donné les équations de propagation.

Voyons graphiquement ce que cela signifie dans le cas d'une onde étudiée suivant un rayon (fig. 12).

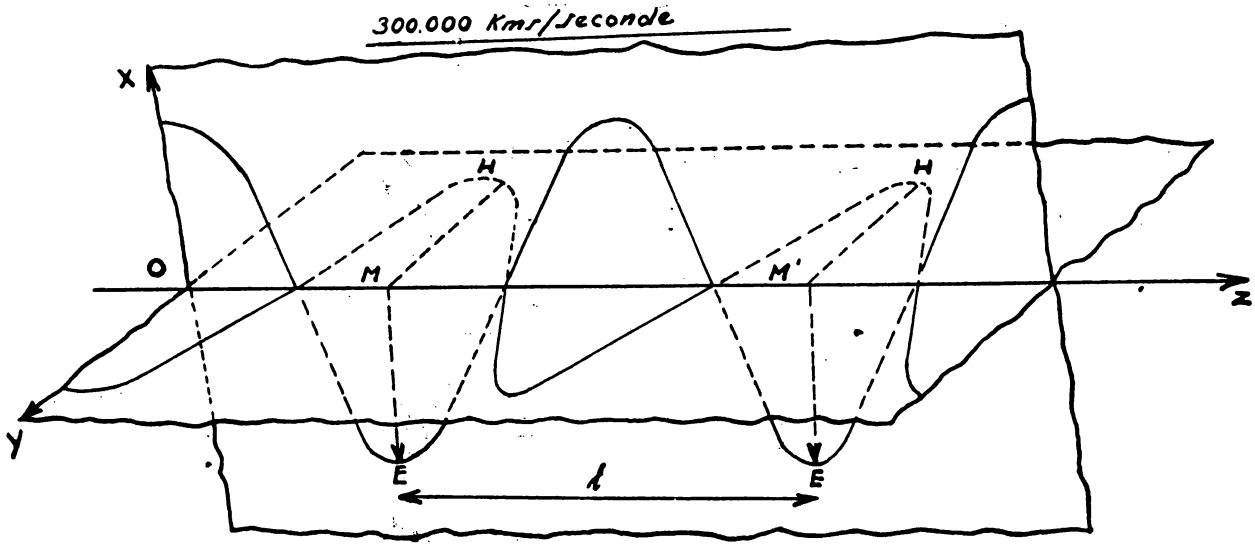


Fig. 12

En un point M du parcours, les deux courbes représentant les variations des deux champs H et E donnent les valeurs et le sens de ces champs.

Le trièdre champ magnétique, champ électrique, sens du déplacement est celui d'Ampère.

Les champs sont « en phase » puisqu'ils passent par leurs maxima, leurs minima et la valeur zéro au même instant.

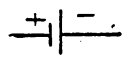
L'onde électromagnétique se propage dans toutes les directions à partir de la source : elle est donc sphérique. Les champs E et H sont dans le plan tangent en M à une sphère, lieu géométrique de tous les points où le champ électromagnétique est le même.

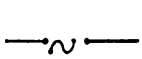
En un point M, E et H oscillent entre leurs maxima positifs et négatifs. Le temps qui s'écoule entre deux états identiques en M s'appelle la période, T.

L'onde se propageant, au bout du temps T le front d'onde aura atteint un point M' situé à une distance λ de M. λ (kilomètres) = T × 300 000 (km/seconde), λ est *la longueur d'onde*, espace parcouru pendant une période et séparant deux points dans des états électromagnétiques semblables.

En M, il s'écoule un temps T entre deux états identiques (une oscillation). *La fréquence*, ou nombre d'oscillations par seconde est donc : $F = \frac{1}{T} = \frac{300\,000}{\lambda \text{ (km)}}$ (cycles/seconde).

Tableau des symboles et abréviations

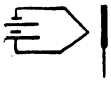

Pile ou accumulateur


Source de courant alternatif

Antenne

Terre ou masse

Filament de tube à vide
(Chauffage direct)


Chauffage indirect

Cathode

Grille

Plaque

Quartz

Microphone

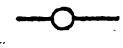
Ecouteurs Téléphoniques

Haut-Parleur

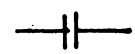
Conducteurs connectés

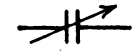
Conducteurs non connectés

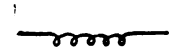
Résistance

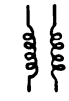

Appareil de mesure

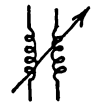
Potentiomètre

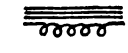

Condensateur

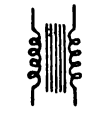

Condensateur variable


Bobinage


Bobinages couple


Couplage variable


Bobine à noyau de fer


Transformateur à noyau de fer

C.O	Circuit oscillant	B.F	Basse fréquence
H.F	Haute fréquence	M.F	Moyenne fréquence

CHAPITRE II

PRINCIPE DES RADIOCOMMUNICATIONS

ONDES HERTZIENNES

Parmi les ondes électromagnétiques, on désigne plus spécialement sous le nom d'ondes hertziennes celles qui sont engendrées par les courants électriques. Inversement les ondes hertziennes sont susceptibles de faire naître des courants variables dans les conducteurs qu'elles atteignent.

Nous voyons donc apparaître la possibilité d'utiliser les ondes hertziennes aux communications à distance. Ce sont elles, en effet, qui sont utilisées pour les radiocommunications.

CLASSIFICATION DES ONDES HERTZIENNES

Le domaine des fréquences caractérisant le rayonnement hertzien est très étendu (cf. classification des ondes électromagnétiques) et on a été amené à classer les ondes hertziennes en plusieurs gammes.

Cette classification n'est pas arbitraire : elle a une base dans l'histoire des radiocommunications et, comme nous allons le voir, dans les différences intervenant dans le mode de propagation à distance des ondes appartenant aux différentes gammes.

On appelle :

— Grandes ondes : la gamme de 3 000 m à 1 000 m (F : 100 à 300 kcs).
— Petites ondes : la gamme de 600 m à 200 m (F : 500 à 1 500 kcs).
— Ondes courtes : la gamme de 100 m à 10 m (F : 3 000 à 30 000 kcs).
— Ondes très courtes : la gamme de 10 m à 1 m (F : 30 à 300 Mcs).
— Ondes ultra-courtes : la gamme des ondes inférieures à 1m.

REMARQUE. — La tendance actuelle semble être d'imposer, pour l'expression des fréquences, le hertz (cycle par seconde) et ses multiples, le kilohertz et le mégahertz.

PROPAGATION DES ONDES HERTZIENNES

Une antenne émettrice simple rayonne des ondes H.F. à peu près dans toutes les directions.

Une partie de l'énergie rayonnée se propage le long de la surface du globe : on l'appelle *onde de sol.*

Au passage de cette onde le long de sa surface, le sol est le siège de courants induits et l'onde de sol s'amortit assez rapidement.

Le reste de l'énergie rayonnée par l'antenne est envoyé vers le haut suivant un certain angle et on l'appelle *onde d'espace*. Cette onde arrivant dans les couches ionisées de la haute atmosphère peut y subir des réfractions et des réflexions diverses et en particulier être renvoyée vers le sol où elle peut parvenir en des points fort éloignés de l'antenne d'émission.

La figure 13 schématise le mode de propagation des ondes hertziennes appartenant aux différentes gammes.

— Elle montre que la portée de l'onde de sol diminue avec la longueur d'onde (pertes par induction dans le sol croissant avec la fréquence).

— Par contre, au fur et à mesure que la longueur d'onde décroît, la propagation de l'onde d'espace se fait dans de meilleures conditions (réflexion sur des couches ionisées de plus en plus élevées).

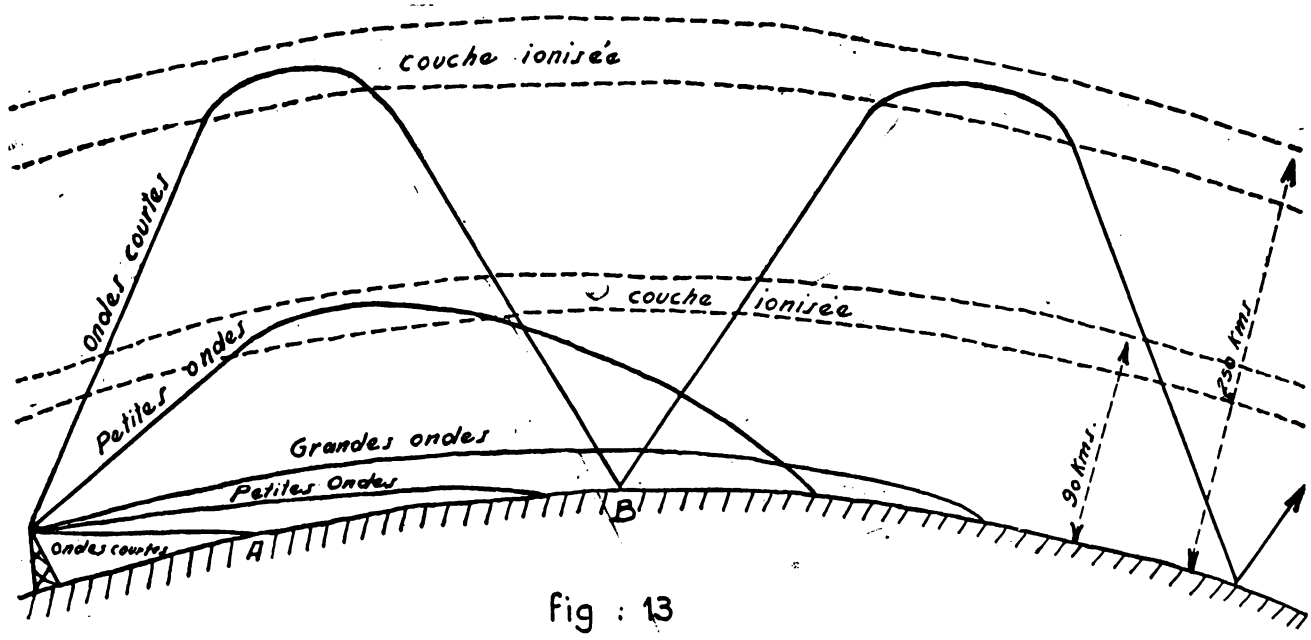


Fig : 13

Les grandes ondes se propagent uniquement sous forme d'ondes de sol. Elles permettent des liaisons intercontinentales, mais au prix de la mise en jeu, dans les antennes d'émission, de puissances considérables.

Pour *les ondes courtes*, la portée de l'onde de sol est très réduite, mais par contre l'onde d'espace permet les liaisons à très grande distance après de multiples réflexions entre l'ionosphère et le sol. Il existe cependant des *zones de silence* assez étendues entre la limite de portée de l'onde de sol et le premier point possible d'arrivée sur le sol de l'onde d'espace après réflexion dans l'ionosphère (entre A et B).

Les petites ondes ne donnent de très grandes portées aux moyennes puissances, ni par ondes de sol dont la propagation est moins favorable que pour les grandes ondes, ni par ondes d'espace se réfléchissant mal sur l'ionosphère.

Enfin, *les ondes très courtes et ultra-courtes* se propagent en ligne droite et leur portée au niveau du sol est limitée à l'horizon de l'antenne d'émission.

La figure 13 est très schématique. En effet, l'ionisation de la haute atmosphère, que l'on attribue essentiellement au rayonnement solaire, varie constamment : elle change en particulier beaucoup du jour à la nuit. Il est connu de tous les exploitants des services de radiocommunications que la portée

des petites ondes et des ondes courtes varie beaucoup suivant les heures de la journée ; on en est conduit, pour réaliser des liaisons sûres à assez grande distance dans ces gammes d'ondes à adopter des fréquences de jour et des fréquences de nuit.

Fading. — Les ondes d'espace se réfléchissant différemment suivant l'ionisation de la haute atmosphère qui varie constamment, les ondes rayonnées par un émetteur peuvent parvenir à un récepteur après avoir suivi différents trajets : elles y donnent lieu à des interférences se manifestant sous forme de renforcements et d'évanouissements des signaux reçus et connues sous le nom de *fading*.

ELEMENTS DES RADIOCOMMUNICATIONS

Pour réaliser une radiocommunication, il faudra :

1°. — Un dispositif capable d'envoyer dans l'espace des ondes hertziennes : c'est le *poste d'émission ;*

2°. — Un dispositif capable de déceler à distance et d'utiliser les ondes ainsi produites : c'est le *poste de réception.*

1° LE POSTE D'EMISSION.

Le poste d'émission comporte essentiellement :

A) un dispositif générateur de courants de haute fréquence (de même fréquence que celle de l'onde à engendrer) : c'est *l'émetteur* proprement dit ;

B) un dispositif rayonnant, grâce auquel les courants de haute fréquence produits par l'émetteur donnent naissance aux ondes hertziennes. Ce dispositif rayonnant est constitué par des conducteurs disposés d'une manière appropriée dans l'espace : c'est *l'aérien d'émission* ou *antenne.*

2° LE POSTE DE RECEPTION.

Le poste de réception comporte :

A) un dispositif collecteur d'ondes, qui est constitué par *l'aérien de réception* (antenne ou cadre), dans lequel les ondes hertziennes incidentes induisent des courants de même fréquence ;

B) un dispositif utilisateur des courants H.F. engendrés dans l'aérien de réception : c'est le *récepteur* proprement dit.

Il est évident que les principes généraux de fonctionnement des émetteurs et des récepteurs doivent être analogues. En effet, les uns et les autres mettent en jeu des courants électriques de haute fréquence, de même fréquence pour un couple émetteur-récepteur, et manipulés ou modulés selon des procédés fixes déterminant la constitution des appareils émetteurs et récepteurs.

D'une manière plus précise, on constate que les appareils tant émetteurs que récepteurs sont essentiellement constitués par des assemblages plus ou moins variés :

— de *circuits* électriques à base de circuits oscillants,

— de *tubes électroniques* aussi appelés lampes.

L'étude des uns et des autres fera l'objet des deux prochains chapitres. La variété de leurs assemblages s'explique par la variété des fonctions qu'ils auront à remplir : celles-ci seront étudiées dans les chapitres suivants : chapitres VI à VIII.

Nous verrons ensuite plus en détail la constitution d'ensemble d'un émetteur et d'un récepteur mettant en jeu ces différentes fonctions, mais il est nécessaire auparavant d'avoir une idée générale de leur organisation.

PRINCIPES GENERAUX D'ORGANISATION DES EMETTEURS ET DES RECEPTEURS

1° Les émetteurs

a) *Radiotélégraphie.*

L'émetteur radioélectrique le plus simple (figure 14) est constitué par un dispositif d'alimentation en courant continu et par un *oscillateur* engendrant des oscillations électriques H.F. Il est nécessaire, également de disposer d'un moyen de contrôle de cette énergie H.F. engendrée par l'émetteur : le plus simple est d'intercaler un *manipulateur* de télégraphe en série entre l'alimentation et l'oscillateur : il permettra de découper les ondes émises suivant un code convenu (Morse).

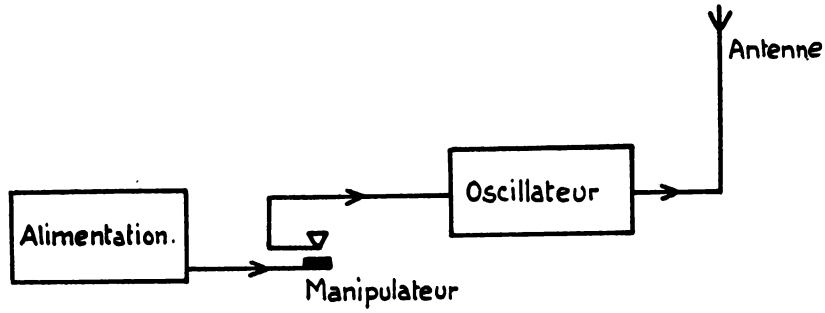


Fig : 14

La puissance à la sortie de l'oscillateur, ou puissance H.F. est en général insuffisante pour permettre à l'antenne de rayonner à grande distance. On emploie donc généralement dans les émetteurs un dispositif destiné à augmenter la puissance H.F. fournie par l'oscillateur : c'est un *amplificateur* H.F. Cet étage apparaît sur la figure 15.

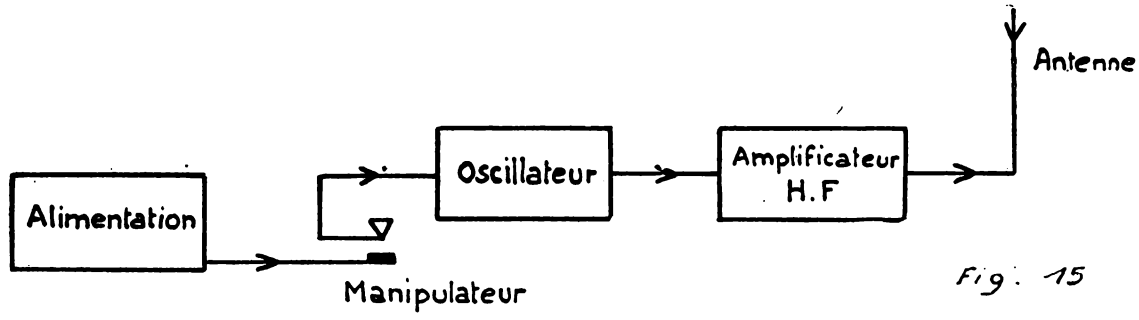


Fig. 15

b) *Radiotéléphonie.*

Pour transmettre des messages parlés, il faut contrôler le courant de sortie de l'émetteur conformément aux fréquences de la voix (basses fréquences). On emploie pour cela un *modulateur* qui augmente ou diminue le courant de sortie de l'émetteur conformément aux fréquences de la voix lorsque celle-ci agit sur un microphone. On appelle ce procédé *modulation*, et l'onde H.F. affectée par ce procédé onde modulée. La figure 16 montre le schéma de principe d'un émetteur radiotéléphonique.

2° Les récepteurs

Le récepteur le plus simple (récepteur élémentaire) est représenté par la figure 17.

Les ondes hertziennes provenant d'un émetteur induisent dans l'antenne du récepteur des courants

électriques de haute fréquence. Si un écouteur téléphonique était relié directement à l'antenne, il ne reproduirait (en supposant qu'il fonctionne) aucun son, car l'oreille humaine n'est pas sensible aux fréquences radioélectriques (H.F.). Il faut donc traduire les courants H.F. reçus en courants variables de basse fréquence (fréquences audibles). Le dispositif employé à cette fin dans le récepteur s'appelle *détecteur*.

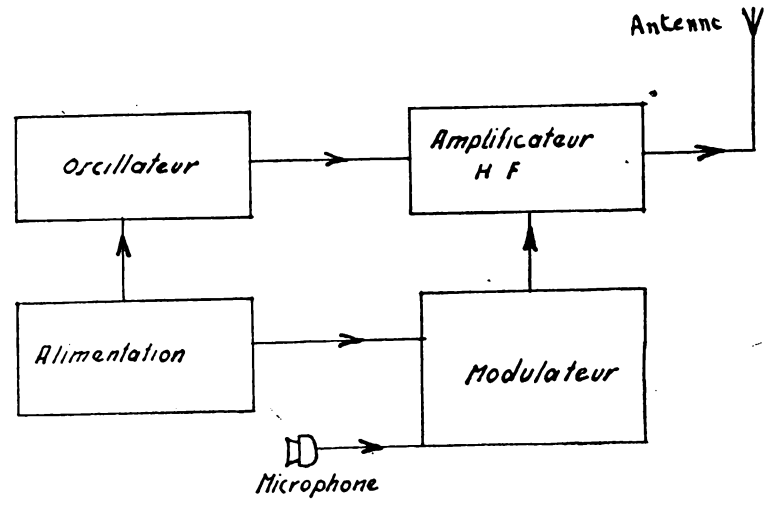


Fig. 16

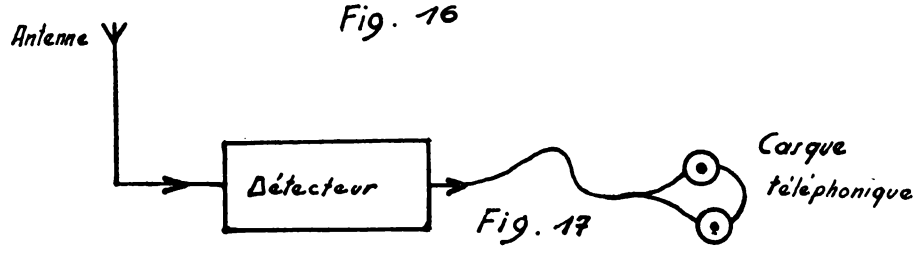


Fig. 17

Il faut que le récepteur possède également un dispositif lui permettant de choisir entre les ondes parvenant à son antenne celles qui correspondent à l'émission que l'on désire recevoir : il comportera un circuit accordé sur la fréquence de cette émission.

Les signaux arrivant à l'antenne du récepteur sont très faibles lorsque l'émetteur est assez éloigné. Les sons produits par l'écouteur téléphonique peuvent être trop faibles pour être audibles. Pour augmenter la puissance du courant B.F. à la sortie du détecteur de façon à obtenir un fonctionnement convenable de l'écouteur téléphonique, la plupart des récepteurs emploient une *amplification B.F.*

— Si on désire augmenter encore la sensibilité du récepteur pour que celui-ci puisse recevoir facilement des signaux faibles, il est nécessaire de les amplifier avant qu'ils ne parviennent au détecteur : ceci est réalisé par un amplificateur H.F.

L'amplificateur H.F. est muni, comme le détecteur, d'un ou plusieurs circuits accordés, pour n'amplifier que le seul signal désiré : l'emploi d'un amplificateur H.F. donne donc au récepteur non seulement une plus grande sensibilité, mais également une plus grande sélectivité (aptitude à séparer les signaux).

Les éléments essentiels d'un récepteur radioélectrique sont représentés schématiquement par la figure 18.

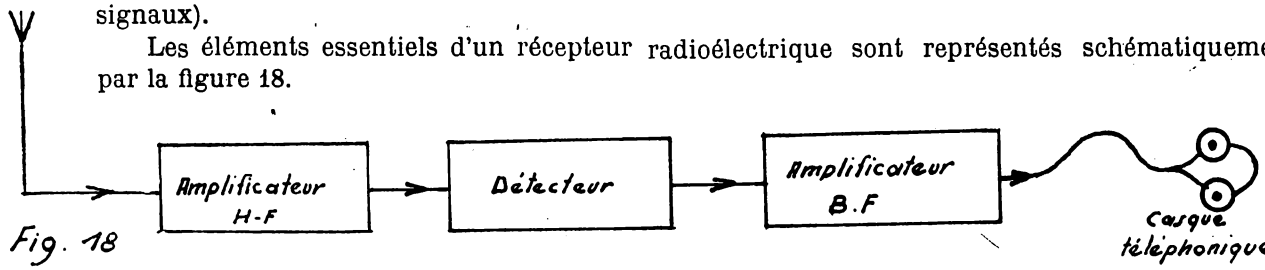


Fig. 18

CHAPITRE III

LE CIRCUIT OSCILLANT

Un circuit oscillant est constitué par un condensateur de capacité C et une bobine de self-induction L reliés entre eux par un conducteur (figure 19). Soit R la résistance ohmique totale du circuit, comportant en outre un interrupteur I et un milliampèremètre M.

Supposons le condensateur chargé et fermons le circuit :

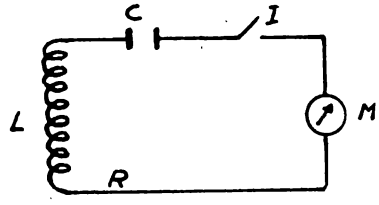


Fig. 19

1er Cas. — La résistance ohmique du circuit est forte par rapport à L et C $\left(R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}\right)$

Le milliampèremètre dévie montrant le passage d'un courant dont l'intensité croît rapidement pour passer par un maximum puis décroître lentement et s'annuler (figure 20).

L'énergie emmagasinée dans le condensateur chargé a été dissipée sous forme de chaleur dans la résistance R.

2e Cas. — La résistance ohmique du circuit est faible par rapport à L et C $\left(R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}\right)$

On obtient une décharge oscillante du condensateur (fig. 21) grâce à l'intervention de la force électromotrice de self-induction de la bobine qui, au moment où le courant a tendance à s'annuler, le prolonge, rechargeant le condensateur en sens inverse.

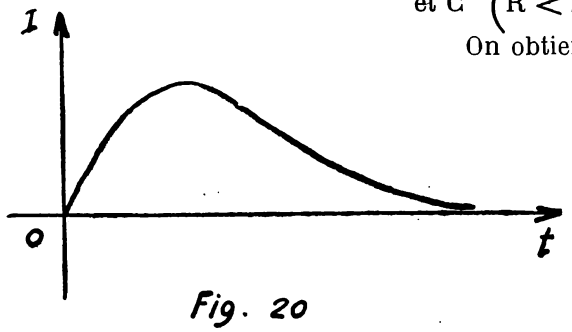


Fig. 20

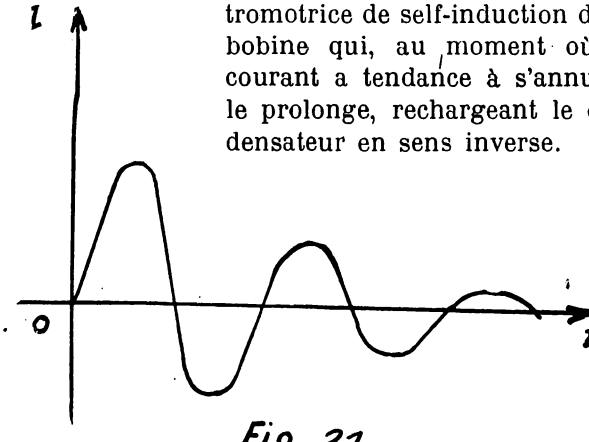


Fig. 21

Le phénomène s'amortit rapidement, une partie de l'énergie électrique se dissipant par effet joule dans la résistance R. Si celle-ci était nulle, le circuit oscillerait indéfiniment.

— On voit donc que, dans certaines conditions, le circuit tel que nous l'avons constitué, peut devenir le siège d'oscillations électriques libres, d'où son nom de circuit oscillant.

La période des oscillations est donnée par la *formule de Thomson* : $T = 2\pi\sqrt{LC}$

et leur fréquence $F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

T en secondes
L en henrys
C en farads

Nous pouvons donc en choisissant convenablement les valeurs de L et C obtenir des oscillations électriques de fréquence bien déterminée.

Nous voyons en particulier que l'on peut, grâce au circuit oscillant, obtenir facilement des oscillations de fréquence élevée, la capacité C étant exprimée en farads, unité excessivement forte ; les capacités des condensateurs courants sont de l'ordre du microfarad (10^{-6} farad) et de ses sous-multiples. On peut également employer des bobines ayant un faible coefficient de self (spires peu nombreuses et assez espacées). Rappelons que $L = 1{,}25 \frac{N^2 S}{l}$

N : nombre de spires
S : surface des spires
l : longueur de la bobine C. G. S.

CIRCUITS RESONANTS

A) *CIRCUIT RESONANT SERIE*

Soit (figure 22) un circuit oscillant dont la bobine de self et le condensateur sont branchés en série aux bornes d'un générateur de courant alternatif.

Le circuit oppose au passage du courant alternatif une certaine résistance apparente appelée *impédance.*

Cette impédance est fonction des 3 caractéristiques du circuit et, comme on va le voir, de la fréquence du courant fourni par l'alternateur $Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{C\omega})^2}$.

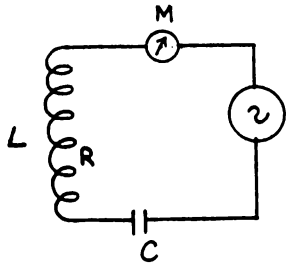


Fig 22

Faisons varier cette fréquence : nous constatons que Z passe par un minimum (déviation maxima du milliampèremètre M) lorsque cette fréquence

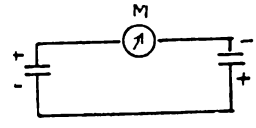


Fig 23

$F = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$, c'est-à-dire lorsque la fréquence du courant donné par l'alternateur est égale à la fréquence sur laquelle est réglé le circuit.

Le circuit oscillant se comporte comme un générateur fournissant un courant de fréquence F couplé en série avec la source de courant alternatif (figure 23).

B) *CIRCUIT RESONANT PARALLELE*

Soit (figure 24) un circuit oscillant dont la bobine de self et le condensateur sont branchés en parallèle dans le circuit où débite le générateur de courant alternatif.

Faisons varier la fréquence du courant fourni par celui-ci. Nous constatons cette fois que pour $F = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ le circuit oscillant oppose une impédance maxima au passage du courant indiquée par un minimum d'intensité au milliampèremètre M_1. Par contre un milliampèremètre M_2 branché dans le circuit oscillant indique à ce moment-là un maximum de courant.

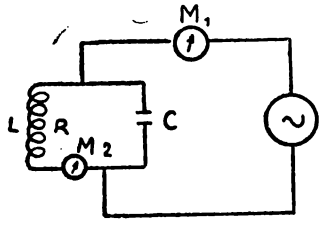


Fig. 24

L'alternateur et le circuit oscillant fonctionnent comme 2 générateurs montés en parallèle (figure 25).

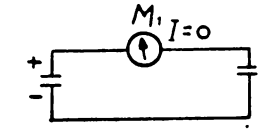


Fig. 25

INTERET DU CIRCUIT OSCILLANT EN RADIOELECTRICITE

L'ensemble self-capacité, soumis à l'excitation d'un courant de fréquence égale à sa fréquence propre, oscille et il peut rayonner autour de lui un champ électromagnétique (utilisation à l'émission).

Inversement (figure 26) cet ensemble oscille lorsqu'il est soumis à un champ électromagnétique (utilisation à la réception) : le champ magnétique induit un courant dans la self ; le champ électrique charge le condensateur en soumettant ses armatures à une différence de potentiel. L'un ou l'autre de ces effets suffira à amorcer les oscillations puisque l'un ou l'autre provoque l'apparition d'un courant.

Le circuit oscillant, pour une self L déterminée et pour une capacité C déterminée, travaille sur une fréquence déterminée. Il sera à l'émission comme à la réception l'organe essentiel d'un poste de radiocommunication.

COUPLAGE DE DEUX CIRCUITS — COURBES DE RESONANCE

Soit (figure 27) deux circuits oscillants couplés par induction entre leurs bobines de self placées à proximité l'une de l'autre:

Nous supposons que le circuit I est le siège d'oscillations entretenues de période $T_1 = 2\pi \sqrt{L_1C_1}$. Voyons comment réagira le circuit II.

1°) *Couplage lâche entre les circuits.*

Faisons varier la période propre du circuit II en agissant sur le condensateur variable C_2 de ce circuit.

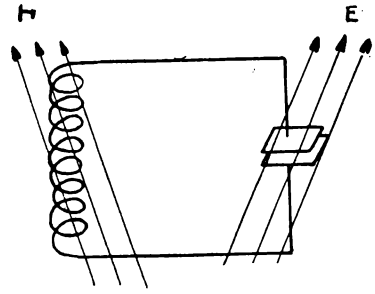


Fig. 26

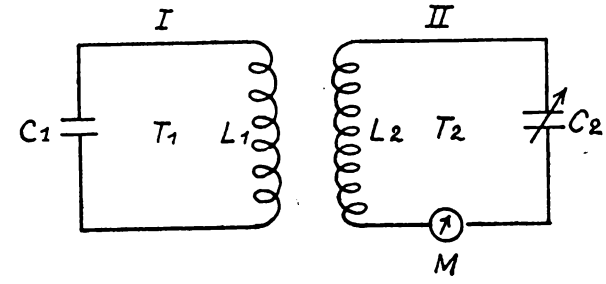


Fig. 27

Lorsqu'on a $T_1 = T_2$ c'est-à-dire $\sqrt{L_1C_1} = \sqrt{L_2C_2}$, on constate que le milliampèremètre M placé dans le circuit II indique un maximum d'intensité assez prononcé. (figure 28).

Le circuit oscillant favorise donc les oscillations de fréquence égale à sa fréquence propre et il diminue partiellement celles dont la fréquence s'en écarte.

2°) *Le circuit II a une grande résistance ohmique : il est « amorti ».*

Nous constatons alors que plus la résistance ohmique du circuit est importante moins est accentué le maximum par lequel passe l'intensité du courant dans ce circuit à la résonance (figure 29) : la résonance est beaucoup moins nette (courbes de résonance 1, 2, 3 traduisant un amortissement croissant).

3°) *Couplage variable.*

Faisons varier le couplage des circuits accordés sur la même période T_1 et traçons les courbes de résonance correspondant à des couplages de plus en plus serrés obtenus en rapprochant de plus en plus les bobines L_1 et L_2 (figure 30).

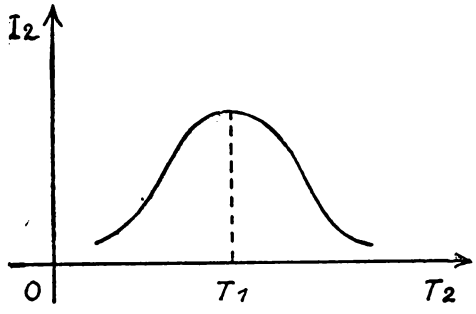


Fig 28

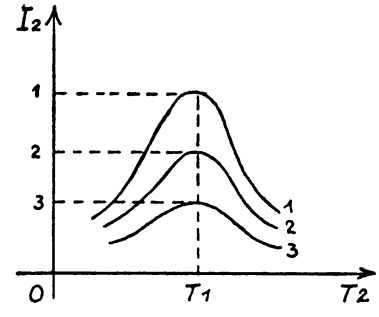


Fig. 29

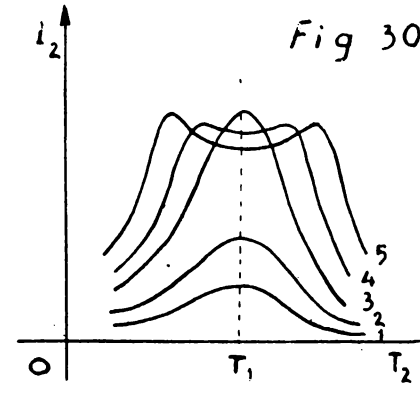


Fig 30

La résonance est plus marquée au fur et à mesure que le couplage est plus serré (courbes 1, 2, 3) mais à un moment donné la courbe s'élargit (courbes 4 et 5) et présente 2 maxima. La courbe 3 correspond à un couplage sélectif : résonance aigue. Les courbes 4 et 5 indiquent qu'avec un couplage très serré le circuit II marquera une résonance assez marquée pour une bande de fréquences assez large : la résonance subsiste quand on fait varier T_2 de part et d'autre de T_1 en agissant sur le condensateur variable C_2.

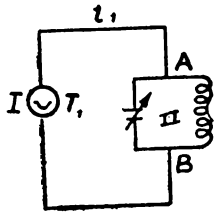


Fig. 31

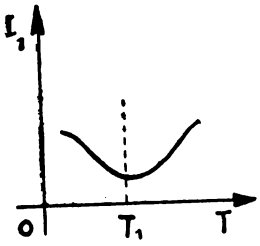


Fig. 32

En radioélectricité, lorsqu'on aura à faire passer une bande de fréquences assez large (10 kylocycles environ en radiotéléphonie, plusieurs mégacycles en télévision) on aura donc intérêt à « surcoupler » les circuits, réalisant ce qu'on appelle un *filtre de bande.*

Circuit antirésonant ou circuit bouchon (figure 31). Lorsque le circuit II monté en parallèle dans le circuit I est accordé sur la période T_1, l'intensité i_1 dans le circuit I est minima (figure 32) : le circuit II présente une grande impédance aux courants de période T_1 : sa sélectivité s'oppose au passage des courants de période T_1 : il joue le rôle de *bouchon* pour la période T_1. D'où son emploi comme filtre pour éliminer une fréquence gênante.

Remarque 1. *Modes de couplage.*

Nous avons fait l'étude de la résonance entre deux circuits couplés sur un cas particulier (fig. 27) ; les deux circuits étaient couplés par induction (couplage électromagnétique).

Signalons en passant qu'il existe différents modes de couplage de deux circuits :

— Couplage électromagnétique ou par champ magnétique (figure 33).
— Couplage électrostatique ou par champ électrique (figure 34).
— Couplage ohmique (galvanique) ou couplage par résistance (figure 35).

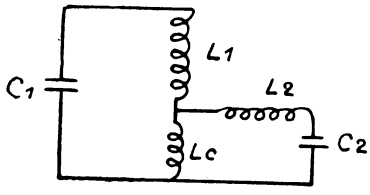


Fig. 33

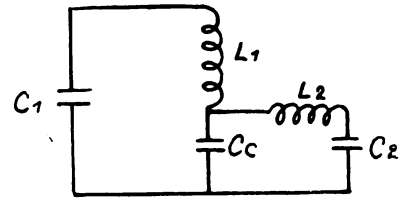


Fig. 34

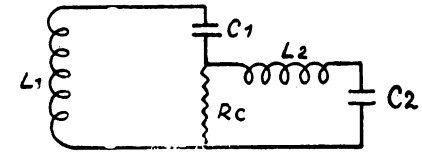


Fig. 35

— Couplages mixtes (figure 36) réalisant des combinaisons des précédents : on peut imaginer un certain nombre de variantes.

Ces différents modes de couplage que nous venons d'énumérer rapidement ne représentent que différents procédés de transfert d'énergie d'un circuit à un autre. Le couplage joue un rôle très important en radioélectricité, réalisant la liaison entre les différents « étages » des émetteurs et récepteurs : nous aurons l'occasion d'en parler plus en détail à propos des amplificateurs.

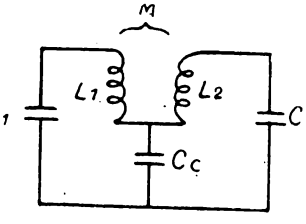


Fig 36

Remarque 2. *Adaptation d'impédance.*

Signalons au passage une loi dont il faut tenir compte pour obtenir un bon rendement dans le couplage des circuits :

Pour que le maximum d'énergie passe d'un circuit à un autre, les impédances des deux circuits doivent être égales.

Si, par exemple, un générateur de courant alternatif a une impédance de 100 ohms, il délivrera le maximum d'énergie à un circuit ayant une impédance de 100 ohms.

CHAPITRE IV

LES TUBES A VIDE

Nous avons fait remarquer au chapitre II que les postes de radiocommunications, émetteurs ou récepteurs, étaient constitués essentiellement de circuits électriques associés à des tubes à vide.

Les tubes à vide sont très divers et leurs emplois multiples. Nous allons les étudier rapidement en commençant par les plus simples et en indiquant leurs caractéristiques.

Nous étudierons ultérieurement les principales fonctions qu'ils peuvent remplir.

EMISSION THERMOELECTRONIQUE

Le phénomène qui est à la base du fonctionnement de tous les tubes à vide est « l'émission thermoélectronique » : sous l'influence de la chaleur, les métaux ou certains de leurs oxydes peuvent perdre facilement leurs électrons libres, ceux-ci ayant acquis sous cette influence une énergie cinétique suffisante pour en traverser la surface. Cet effet thermoélectronique a été mis en évidence dans le vide par Edison en 1883.

LA LAMPE DIODE

(Valve de Fleming - 1904)

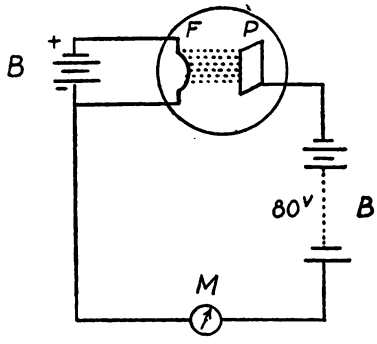


Fig. 37

Dans une ampoule vide d'air (figure 37), un filament de tungstène, chauffé au rouge par une batterie de chauffage B, émet des électrons.

Si une plaque métallique, placée à proximité du filament dans l'ampoule, est portée à un potentiel positif par rapport au filament par une batterie d'accumulateurs B', le milliampèremètre M placé dans le circuit indique le passage d'un courant.

Les électrons (négatifs) émis par le filament ont été attirés par la plaque positive ; soumis au champ de force électrique créé par la batterie B', ils acquièrent une certaine énergie $1/2\ mv^2 = eV$ qu'ils perdent sous forme de chaleur en frappant la plaque : celle-ci s'échauffe et peut même rougir.

Traçons la courbe indiquant les variations du courant en fonction du potentiel de la plaque que l'on fait augmenter progressivement en augmentant le nombre des éléments de la batterie B' mis en service (figure 38).

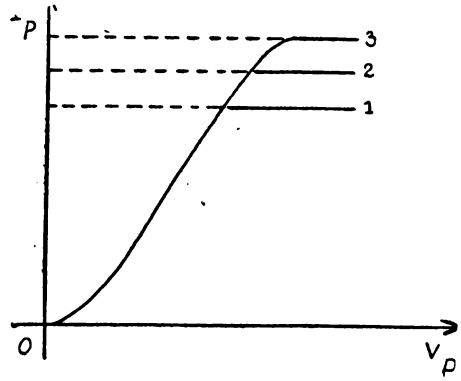


Fig. 38

Cette courbe est presque linéaire mais s'incurve à un moment donné pour prendre une allure horizontale indiquant un *courant de saturation :* cela s'explique : à ce moment, on a beau continuer à augmenter le potentiel de la plaque, celle-ci ne peut capter plus d'électrons que n'en émet le filament : l'intensité du courant n'augmente plus, la courbe marque un palier. Ce palier est d'autant plus élevé que le filament est plus chaud et émet donc plus d'électrons : courbes 1, 2, 3 obtenues au fur et à mesure que l'on chauffe davantage le filament.

— Si la batterie B' était inversée, la plaque, chargée négativement par rapport au filament n'attirerait pas les électrons et aucun courant ne passerait dans le circuit. *La lampe diode ne laisse passer le courant que dans un seul sens*, d'où son nom de valve et son emploi comme redresseur de courant et comme détecteur.

CARACTERISTIQUES DE LA LAMPE DIODE

A) RESISTANCE INTERNE

Il est bien évident que l'espace filament-plaque offre une certaine résistance au passage des électrons.

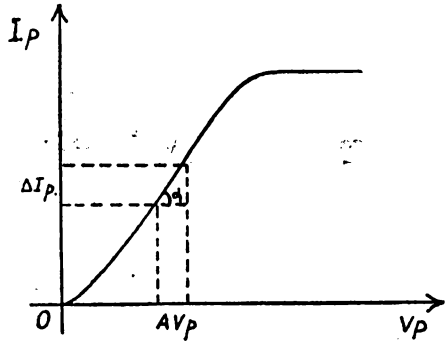


Fig. 39

La courbe caractéristique de la lampe diode n'étant pas rectiligne, cela montre qu'il n'y a pas dans la lampe un rapport constant entre la différence de potentiel et l'intensité du courant. La lampe ne se comporte donc pas exactement comme un conducteur métallique suivant la loi d'Ohm.

Cependant (figure 39), lorsque le fonctionnement de la diode ne fait intervenir que de petites variations du potentiel de plaque, surtout dans la partie ascendante de la courbe, on peut considérer celle-ci comme rectiligne et appliquer à la diode la loi d'Ohm.

$$\rho = \frac{\Delta\, Vp}{\Delta\, Ip}.$$

ρ est appelée *résistance interne de la lampe.* Elle est définie autour du point de fonctionnement moyen.

B) *PENTE*

La résistance interne de la lampe apparaît comme l'inverse de la pente de la caractéristique au point de fonctionnement moyen, *la pente* étant définie par la tangente de l'angle α de la courbe avec l'horizontale. On la désigne par la lettre P ou la lettre S :

$$S = \frac{\Delta\, Ip}{\Delta\, Vp} = \frac{1}{\rho}.$$

La pente de la lampe diode étant exprimée par l'inverse de sa résistance interne est parfois appelée *conductance.* En effet la diode laisse passer d'autant plus de courant que sa pente est plus grande.

Observations

1. *Chauffage indirect (figure 40).*

Au lieu d'être émis directement par le filament, les électrons peuvent être émis par une *cathode*, petit tube métallique recouvert d'un oxyde de métal alcalinoterreux (baryum, strontium etc.), chauffé par le filament passant par son axe et isolé électriquement de la cathode.

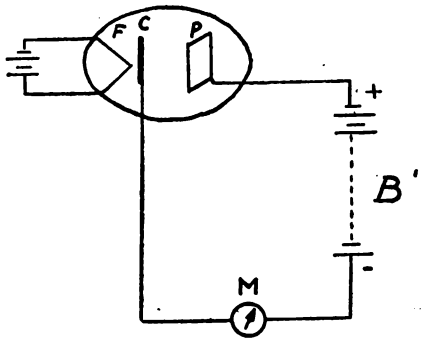


Fig. 40

La plaque, elle, est appelée anode.

Les principaux avantages de la cathode sont :

— de rendre le circuit de chauffage indépendant du circuit de la lampe (utilisation possible des courants alternatifs) ;
— son potentiel constant sur toute sa longueur ;
— sa grande surface permettant une émission d'électrons plus importante.

2. *Charges spatiales.*

Si les charges des électrodes intervenaient seules pour déterminer le mouvement des électrons, le courant électronique devrait atteindre la saturation dès que le potentiel de l'anode est supérieur à celui de la cathode. Mais les charges propres des électrons interviennent également : ceux qui sortent de la cathode ont tendance à être repoussés par ceux qui sont déjà en route vers l'anode.

Ainsi pour les faibles tensions d'anode, tous les électrons sortant de la cathode n'arrivent pas à être captés par l'anode ; le champ de l'anode n'arrivant pas à les atteindre tous, il s'en accumule autour de la cathode.

Ces charges spatiales ont un rôle essentiel : ce sont elles qui déterminent la pente de la partie ascendante de la caractéristique de la lampe, c'est-à-dire la variation d'intensité du courant électronique correspondant à une variation donnée de la différence de potentiel entre électrodes.

Dans les applications des lampes électroniques, la grandeur de cette pente joue un rôle essentiel.

3. *Nécessité d'un vide poussé dans le tube.*

Si le vide n'était pas réalisé dans le tube, les électrons rencontreraient sur leur trajet entre cathode et anode des molécules gazeuses.

Les chocs au hazard des électrons contre ces molécules enlèveraient à leur mouvement de sa régularité.

EMPLOI DE LA LAMPE DIODE COMME REDRESSEUR DE COURANT

La lampe diode est utilisée en valve pour obtenir à partir du courant alternatif 110 V du secteur les différentes tensions continues nécessaires à l'alimentation des postes. Nous pouvons obtenir ces tensions en alternatif en donnant aux secondaires d'un transformateur, dont le primaire est alimenté par le secteur, le nombre de spires correspondant aux rapports de transformation que l'on veut obtenir :

$$\frac{E_2}{110} = \frac{N_2}{N_1}.$$

Si nous avons $\frac{N_2}{N_1} = 4$, nous trouvons en service dans le circuit de la lampe les 440 V du secondaire (figure 41).

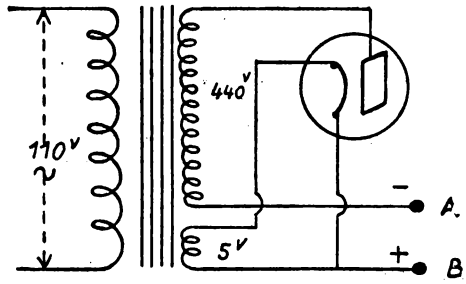


Fig. 41

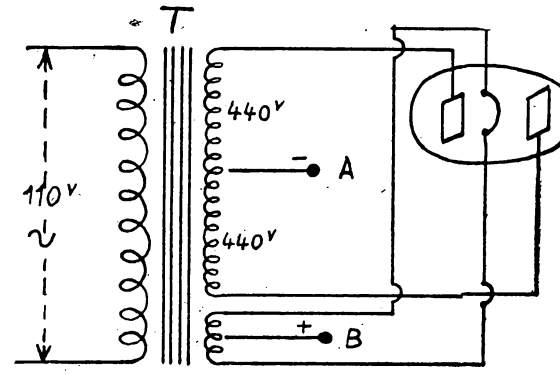


Fig. 45

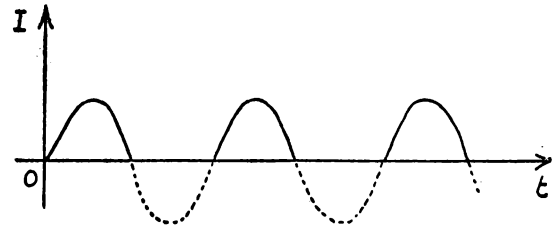


Fig. 42

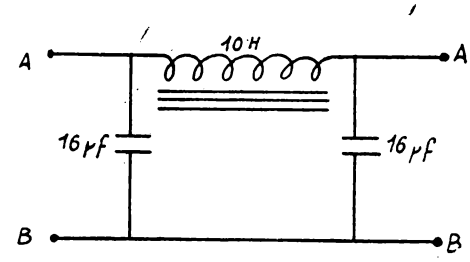


Fig 46

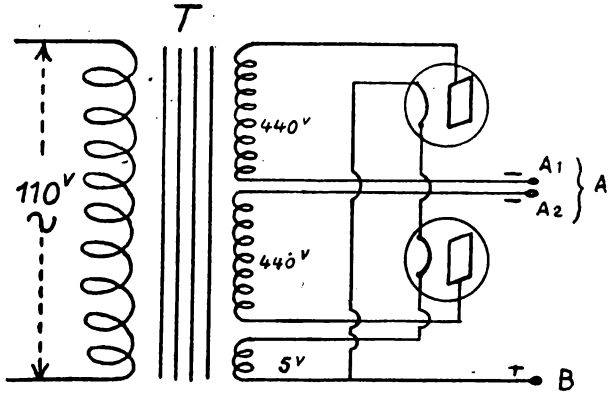


Fig. 43

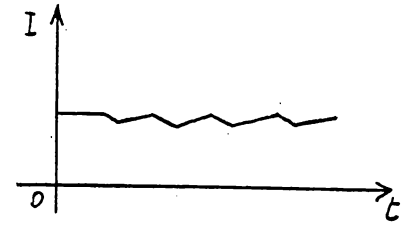


Fig. 47

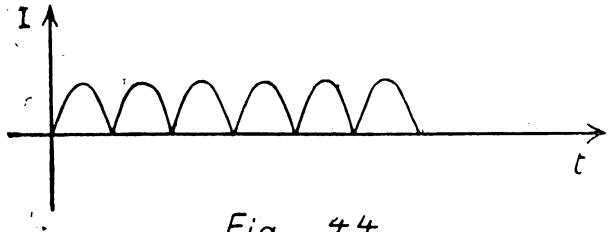


Fig. 44

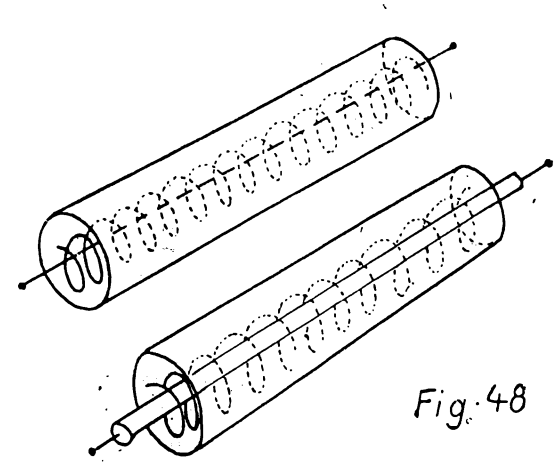


Fig. 48

Mais celle-ci ne laissant passer que l'alternance du courant rendant la plaque positive, nous disposons entre nos 2 bornes de sortie d'un courant de la forme représentée par la figure 42 : c'est un courant unidirectionnel.

— *Redressement des 2 alternances.* — Si, au lieu d'un seul enroulement de 440 V, nous en avons deux, branchés dans le circuit de deux lampes diodes montées symétriquement, nous pouvons redresser les 2 alternances du courant (figure 43).

Lorsque P_1 est positive, P_2 est négative et inversement : la somme des courants recueillis entre les bornes de sortie A et B a la forme indiquée par la figure 44. Nous avons ainsi redressé les 2 alternances du courant.

— Au lieu d'utiliser comme redresseur à 2 alternances 2 lampes diodes ainsi couplées, on préfère utiliser une *valve biplaque* comportant 2 plaques de diode associées à une cathode commune dans la même ampoule (figure 45).

REMARQUE. — Ces valves, en raison de leur résistance interne élevée (de l'ordre de 20 000 ohms), ne peuvent redresser que des courants de faible intensité : quelques dizaines de milliampères.

Filtrage

Le courant obtenu est du courant unidirectionnel ondulé à 100 périodes, mais n'est pas encore réellement du courant continu. Il ne le devient approximativement qu'après filtrage dans un circuit représenté par la figure 46.

Les 2 condensateurs se chargent au moment des maxima de tension et restituent l'énergie ainsi emmagasinée au moment où la tension a tendance à être nulle : la bobine est une *bobine d'arrêt* ayant une forte réactance à la fréquence du courant alternatif de fréquence 100 et une faible résistance ohmique : elle s'oppose aux variations de courant et, ayant une faible résistance ohmique, permet au courant continu de passer. Entre les bornes d'utilisation A' et B' est recueilli un courant à peu près continu (figure 47).

LA TRIODE

Tous les tubes à vide (à l'exception de la diode et de la valve biplaque) dérivent de la lampe triode dont il importe de bien connaître les caractéristiques et le fonctionnement.

La triode comporte, dans une ampoule vide d'air :

1° — Soit un filament émettant directement les électrons (lampe à chauffage direct) ;
— soit une cathode, chauffée par conduction par un filament et chargée d'émettre les électrons (lampe à chauffage indirect).

2° — Une grille constituée par un fil métallique enroulé en spirale.

3° — Une plaque constituée par un cylindre métallique. Grille et plaque ont le filament pour axe géométrique (figure 48).

ROLE DE LA GRILLE. — Nous entrevoyons immédiatement qu'en portant la grille à un potentiel plus ou moins élevé par rapport à la cathode nous pouvons favoriser plus ou moins le passage des électrons de la cathode vers l'anode : la grille, en les attirant ou les repoussant plus ou moins fera varier ainsi l'intensité du courant dans le circuit d'anode.

ETUDE DE LA TRIODE — CARACTERISTIQUES

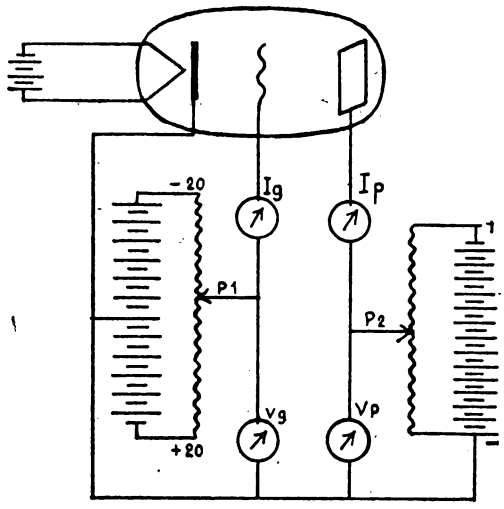


Fig 49

Réalisons le montage représenté par la figure 49. A l'aide des potentiomètres P_1 et P_2 nous pourrons fixer à volonté respectivement les potentiels de grille et de plaque de la lampe, leurs valeurs étant indiquées par le voltmètre placé sur chacun des circuits ; nous connaîtrons la valeur des courants circulant dans ceux-ci aux indications marquées par un microampèremètre placé dans le circuit de grille et par un milliampèremètre placé dans le circuit de plaque.

Première expérience.

Supposons la cathode à une température constante assez élevée pour qu'elle libère des électrons *et la grille placée par P_1 à un potentiel fixe* peu négatif par rapport à la cathode, — 4 V, par exemple.

Au moyen du potentiomètre P_2 faisons varier le potentiel de la plaque, en partant de zéro et en l'augmentant progressivement.

A un moment donné, le milliampèremètre placé dans le circuit de plaque indique le passage d'un courant ; la plaque, suffisamment positive, attire les électrons émis par la cathode.

Traçons la courbe représentative des variations du courant plaque en fonction des variations du potentiel de celle-ci (fig. 50).

Nous obtenons une caractéristique analogue à celle de la diode mais un peu décalée.

La résistance interne de la lampe est définie dans les mêmes conditions que dans la diode : $\rho = \frac{\Delta Vp}{\Delta Ip}$.

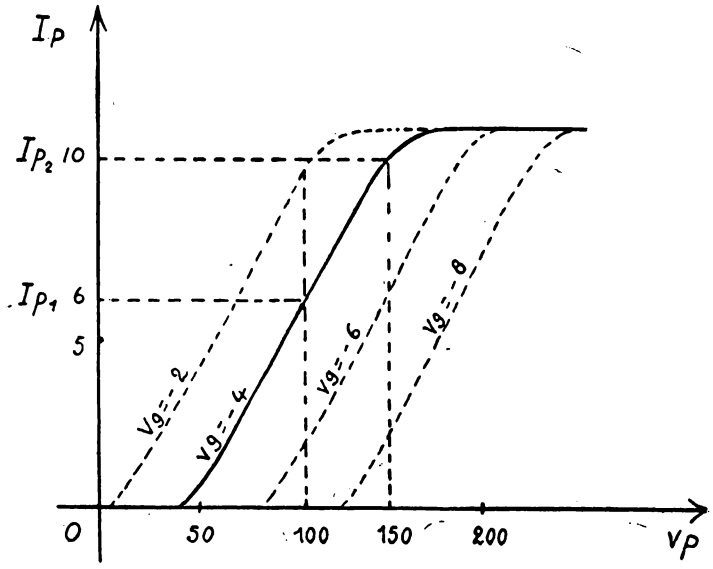


Fig. 50

Deuxième expérience.

Si nous opérons comme dans la première expérience, mais en donnant au potentiel de la grille successivement d'autres valeurs fixes : — 8V, — 6V, — 2V, etc. nous obtenons (figure 50) des courbes semblables (en pointillé) mais décalées par rapport à la courbe tracée pour Vg = — 4V.

Nous voyons sur la figure 50 que l'on peut obtenir une même variation d'intensité du courant plaque ($Ip_2 - Ip_1 = 4$ mA) de deux façons :

— soit en augmentant la tension plaque de 50 volts, dans la première expérience ;

— soit en diminuant le potentiel négatif de la grille de 2 volts en le portant à — 2V.

Une variation de 50 volts de tension plaque produit donc le même résultat qu'une variation de 2 volts de potentiel grille ; 1 volt grille a le même effet que 25 volts plaque.

On dit que *le coefficient d'amplification en volts* de la lampe est de 25.

Il est désigné par la lettre K. $K = \frac{\Delta Vp}{\Delta Vg}$.

Le coefficient d'amplification d'un tube dépend des positions respectives des électrodes. Il augmente lorsqu'on rapproche la grille de la cathode ou qu'on en éloigne la plaque ; il augmente également quand la grille a un pas plus serré.

Il y a une limite à l'augmentation du coefficient d'amplification d'une lampe ; en effet, en l'augmentant on augmente sérieusement la résistance interne de la lampe et la tension à appliquer à sa plaque. En pratique, à l'exception de quelques triodes conçues pour des emplois particuliers, une bonne triode a un coefficient d'amplification d'environ 25.

Troisième expérience.

Fixant la plaque à un potentiel donné, 150 V par exemple, nous allons étudier les variations du courant plaque en fonction des variations du potentiel de la grille que nous ferons varier d'une façon continue en agissant sur le potentiomètre P_1 à partir de la position rendant la grille le plus négative possible.

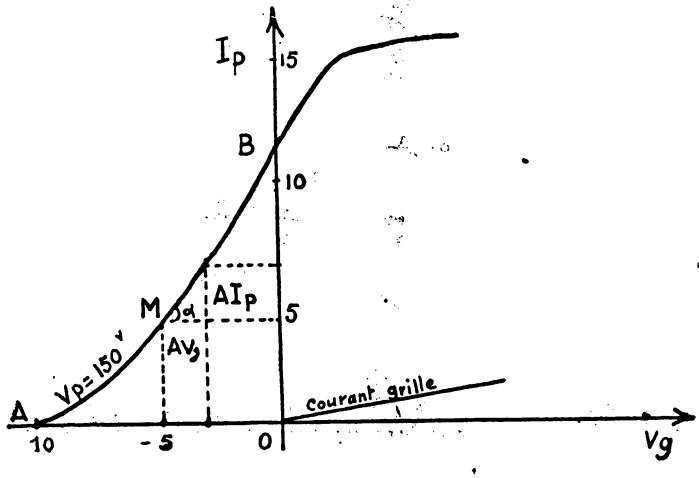


Fig. 51

Nous constatons d'abord (figure 51) qu'au-dessous d'un point appelé « cut off » (point de coupure) correspondant pour la lampe étudiée à — 10V, il n'y a pas de courant plaque. Ensuite, quand on augmente Vg, le courant plaque augmente puis atteint un maximum. Lorque la grille, devenue positive, capte elle-même des électrons, il apparaît un faible courant dans le circuit de grille.

On appelle *pente* de la triode la pente de la courbe que nous venons de tracer : elle est définie dans la partie rectiligne de la courbe et s'exprime en milliampères par volt : $S = \frac{\Delta Ip}{\Delta Vg}$.

Nous voyons que le courant plaque d'une triode varie dans le même sens que le potentiel grille : ce dernier permet donc de commander le courant plaque. Cette commande est pratiquement instantanée, la vitesse des électrons dans le vide étant de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres/seconde. La lampe triode peut donc constituer un bon relais sans inertie, même aux fréquences assez élevées.

Pour les fonctionnements qui correspondent à l'arc AB de la caractéristique Ip Vg, il n'y a pas de courant grille et le courant plaque est déjà apparu. Nous voyons donc que l'on peut provoquer des variations de courant dans le circuit plaque du tube sans débiter aucun courant dans son circuit de grille, c'est-à-dire sans consommation d'énergie.

— Une lampe triode est, en définitive, caractérisée par :

1° Sa résistance interne : $\rho = \frac{\Delta Vp}{\Delta Ip}$, (1)

2° Son coefficient d'amplification : $K = \frac{\Delta Vp}{\Delta Vg}$, (2)

3° Sa pente : $S = \frac{\Delta Ip}{\Delta Vg}$. (3)

Ces trois caractéristiques ne sont pas indépendantes ; en effet, de l'équation (1) on tire : $\Delta Vp = \rho \Delta Ip$.

En portant cette valeur dans (2) on a : $K = \rho \dfrac{\Delta Ip}{\Delta Vg} = \rho S$

Il suffit de connaître deux caractéristiques d'une lampe pour en déduire la troisième.

— On définit quelquefois une quatrième caractéristique : la *transparence de grille.*

On la désigne par la lettre D. $D = \dfrac{1}{K}$ (4).

Nous avons vu tout à l'heure qu'une lampe triode avait un coefficient d'amplification d'autant plus fort que sa grille était plus serrée donc moins transparente aux électrons. C'est bien ce qu'indique la relation (4).

Les caractéristiques des tubes à vide et leurs conditions d'emploi (courant de chauffage, tension maxima de plaque... etc.) sont fixées par les constructeurs. Elles sont établies en fonction du rôle qu'on veut faire jouer aux tubes.

REMARQUES

1. — Dans un tube à vide, les électrons libérés par la cathode sont soumis aux champs électriques créés par les autres électrodes ; ceux-ci dépendent des tensions auxquelles sont portées ces électrodes. Ces tensions doivent donc être comptées par rapport à la cathode considérée au potentiel zéro.
2. — La propriété essentielle des tubes à vide c'est de nous permettre, à partir de sources de courant continu, d'agir sur des courants variables, par exemple de les amplifier, cette action étant due simplement à l'interposition de grilles sur le passage des électrons, ces grilles introduisant l'élément variation dans le courant d'anode.
3. — Il est bien évident, dans ces conditions, que l'on trouvera dans les circuits des tubes à vide à la fois du courant continu et des courants variables, H.F. par exemple.

   Pour bien comprendre le fonctionnement des tubes à vide, il est indispensable de pouvoir suivre la marche de ces courants dans leurs circuits : on peut y distinguer un circuit à courant continu et un circuit à courants variables, ces deux circuits ayant certaines parties communes.

   Le parcours du courant continu est le suivant : pôle + de la source de tension plaque, plaque, intervalle plaque-cathode, cathode, pôle — de la source d'alimentation.

   Les courants variables, introduits dans le circuit grille entre grille et cathode, se retrouvent dans le circuit plaque et se referment sur la cathode.

   On séparera le courant continu des courants variables par l'emploi de filtres.

   Très fréquemment le châssis métallique des appareils est utilisé pour fermer les circuits des courants variables et du courant continu : on dit que le retour se fait par la masse.

POLARISATION DE GRILLE

Dans l'étude que nous venons de faire de la lampe triode, nous avons vu l'influence des variations du potentiel de la grille sur l'intensité du courant plaque.

Comme le rôle essentiel des tubes à vide est de fournir dans leur circuit de plaque des courants variables amplifiés, on obtiendra ces courants variables à partir de tensions variables appliquées entre grille et cathode.

Mais il y a lieu d'envisager la *tension moyenne de la grille*, c'est-à-dire la tension continue établie entre grille et cathode en l'absence de tensions variables (par exemple, dans un récepteur pendant les silences du poste d'émission). Cette tension est dite *tension de polarisation :* c'est elle qui détermine sur la caractéristique Ip Vg d'un tube le « point de fonctionnement ».

Sur la figure 52 nous voyons que la polarisation de la grille à — 2 volts fixera en M le point moyen de fonctionnement. Si les signaux variables appliqués à la grille font varier son potentiel entre A et B, le point de fonctionnement se déplacera de part et d'autre de M entre les points extrêmes M_1 et M_2.

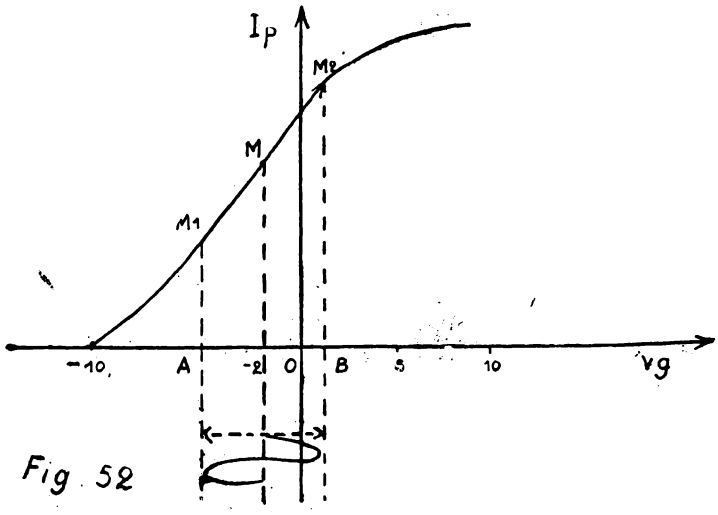


Fig. 52

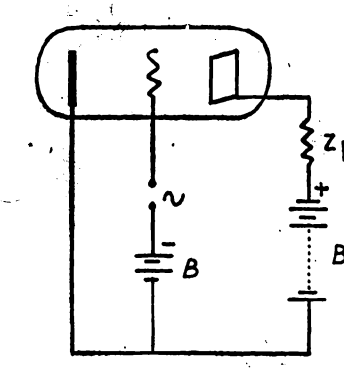


Fig. 53

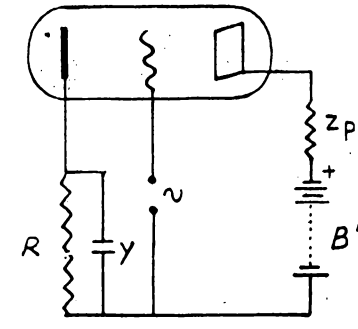


Fig 54

PROCEDES DE POLARISATION

Cette tension de polarisation peut être obtenue de plusieurs façons :

A) *Polarisation fixe.*

La tension de polarisation est fournie par une source fixe de courant, batterie ou redresseur.

La figure 53 représente ce mode de polarisation. La source fixe de tension est constituée par la petite batterie B.

B) *Polarisation automatique.*

Les circuits du tube sont montés de façon qu'il produise lui-même sa polarisation.

— Cette polarisation peut être assurée par *résistance de cathode* (figure 54).

Le courant d'anode en passant dans la résistance R y crée une chute de tension rendant négative par rapport à la cathode l'extrémité reliée à la grille. Celle-ci est donc portée à un potentiel négatif par rapport à la cathode.

Les courants variables sont dérivés de la résistance R par une capacité γ leur offrant une impédance moindre que celle-ci. Seule la composante continue du courant d'anode subit donc une chute de tension dans R, fixant le potentiel moyen de la grille.

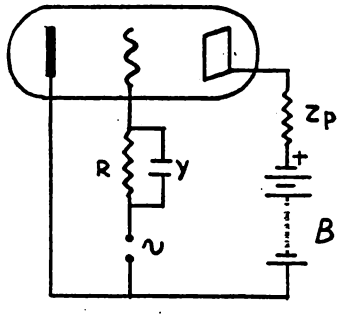


Fig. 55

La chute de tension dans la résistance R réduira évidemment la tension plaque du tube, mais cet inconvénient est compensé par l'avantage pratique consistant en l'inutilité d'une source de polarisation séparée.

— La polarisation automatique peut être également réalisée par *fuite de grille* (figure 55).

Ce type de polarisation suppose l'existence d'un courant grille : c'est celui-ci qui, en passant dans la résistance R fournira la polarisation. La capacité γ, jouant le rôle de filtre pour les courants variables, permet d'assurer à la grille une polarisation négative à peu près constante.

DEFAUTS DE LA LAMPE TRIODE

La triode, bien que très utilisée, présente des défauts et a dû être perfectionnée.

Ses principaux défauts sont :

— l'existence d'une capacité parasite entre grille et anode, dont l'influence varie avec la fréquence des signaux appliqués à la grille : cette influence augmente avec la fréquence et lorsque celle-ci est assez élevée la capacité parasite peut réaliser un couplage entre circuits de plaque et circuit de grille de la lampe ;

— un coefficient d'amplification faible ;

— la grande influence des variations de potentiel plaque sur le courant anodique : nécessité d'avoir des tensions plaques assez élevées constituant un inconvénient sérieux dans les postes portatifs.

TETRODE

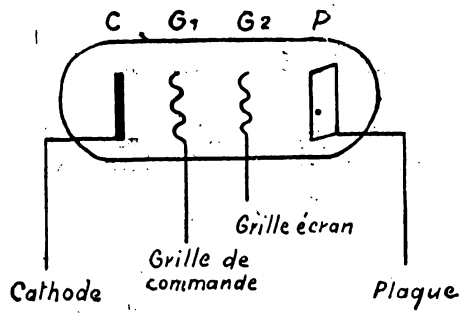


Fig. 56

La tétrode (figure 56) comporte une deuxième grille G_2, dite *grille-écran*, en forme de cage, qui entoure la grille normale, dite grille de commande. Portée à un potentiel positif fixe, elle joue le rôle de cage de Faraday : elle supprime les actions électrostatiques entre grille et anode ; de ce fait elle réduit la capacité parasite et augmente la résistance interne ρ. Le coefficient d'amplification est donc augmenté.

Etant portée à un potentiel positif, la grille-écran attire les électrons émis par la cathode : elle est *accélératrice* ; les électrons la traversent et atteignent l'anode. Le courant plaque dépend plus du potentiel de cette grille-écran que du potentiel de la plaque.

Avantages de la tétrode sur la triode : suppression de la capacité grille-plaque très gênante aux hautes fréquences ; coefficient d'amplification beaucoup plus élevé.

PENTODE

Dans la tétrode, le phénomène « d'émission secondaire » devient gênant alors qu'il passait inaperçu dans la triode. Les électrons venant de la cathode et frappant l'anode arrachent aux atomes de celle-ci des électrons lents qui sont attirés par l'écran porté à un potentiel positif. Il en résulte des courbes caractéristiques présentant des coudes (figure 57) : à un certain moment, une augmentation de tension d'anode produit une diminution de courant.

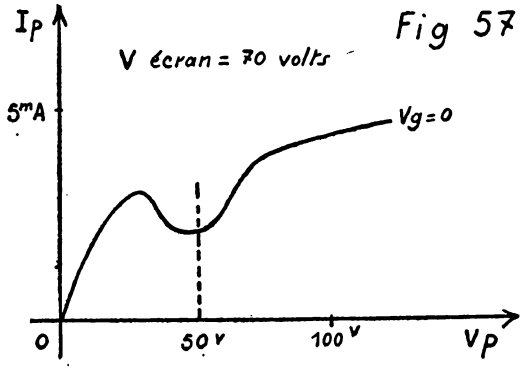


Fig 57

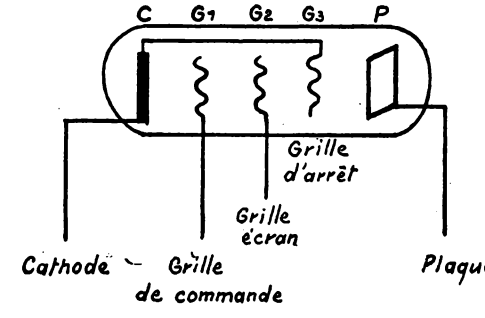


Fig. 58

Pour empêcher cet échange d'électrons entre plaque et écran, on place entre ces deux électrodes une troisième grille dite « *grille d'arrêt* ». Elle est à spires très écartées et, portée au potentiel de la cathode, elle repousse les électrons secondaires venant de l'anode, électrons lents, mais laisse passer les électrons venant de la cathode, ceux-ci, accélérés par la grille-écran, étant très rapides (figure 58).

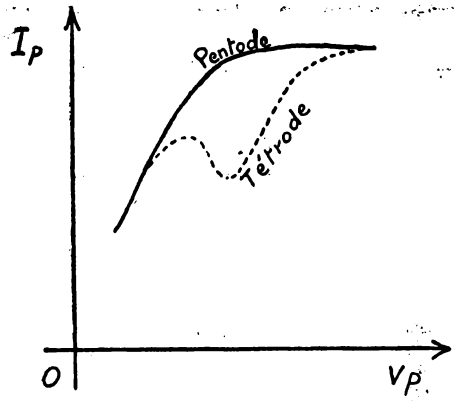


Fig. 59

Le graphique de la figure 59 donne la comparaison entre les courants plaque d'une tétrode et d'une pentode. La pentode a un fonctionnement beaucoup plus stable que la tétrode : elle est très utilisée comme amplificatrice H.F.

REMARQUE. — La suppression de l'effet de l'émission secondaire dans la tétrode peut être obtenue par un autre procédé, celui des *faisceaux dirigés*. La lampe est alors appelée : *tube à concentration électronique*.

HEXODE, HEPTODE, OCTODE

Ces tubes, comportant quatre, cinq ou six grilles, sont généralement destinés à réaliser le changement de fréquence. Ils comportent deux éléments :

— un élément chargé de produire les oscillations locales ;
— un élément amplificateur ou modulateur.

DUODIODE-TRIODE, DUODIODE-PENTODE, TRIODE-PENTODE ETC.

Ces tubes, de types très variés, sont constitués par la réunion dans une même ampoule de plusieurs tubes, double diode et pentode par exemple, la première étant utilisée pour la détection, la deuxième comme premier étage B.F. etc.

TUBES A PENTE VARIABLE

Ce sont des tubes dont la grille de commande est enroulée de façon irrégulière, les spires étant peu espacées aux extrémités et largement espacées au centre.

Dans ces tubes, quand de faibles tensions négatives sont appliquées à la grille, les électrons passent à travers tous les vides de la grille ; mais si la tension négative est augmentée, alors que les électrons ne pourront plus passer à travers les intervalles étroits des deux extrémités, ils pourront toujours passer par les intervalles plus grands du centre de la grille. Il faudra, par conséquent, une tension négative de grille plus forte pour interdire le passage du courant dans ces tubes : le « cut off » est repoussé assez loin vers les tensions négatives de grille (— 25 à — 30 volts). Cela permet d'augmenter considérablement l'étendue de la commande d'amplification par variation de la polarisation de grille et la valeur de la tension du signal qu'on peut lui appliquer.

Les pentodes à pente variable sont utilisées dans les étages amplificateurs H.F. de la plupart des récepteurs modernes.

CHAPITRE V

AMPLIFICATION

GENERALITES - CHARGE DE PLAQUE

Dans l'étude du tube triode, nous avons vu que de faibles variations de tension de grille produisaient dans son circuit de plaque les mêmes variations de courant que des variations de tension de la plaque K fois plus grandes, K étant le coefficient d'amplification en volts du tube.

Nous voyons ainsi apparaître la possibilité d'utiliser, en radioélectricité, le tube triode à l'amplification des signaux : ceux-ci, appliqués à la grille sous forme de tensions variables, entraînent des variations du courant d'anode, variations assez importantes si le tube est à forte pente.

Ces variations du courant d'anode peuvent, soit faire apparaître aux bornes d'une impédance convenable, appelée *charge de plaque*, de fortes variations de tension, soit y développer une énergie appréciable, supérieure à celle qui a été dépensée dans le circuit de grille. Il y a amplification.

L'énergie nécessaire à l'amplification des signaux est empruntée à la source de tension anodique.

Suivant les besoins, on peut rechercher :

— Soit une *amplification en tension*, quand il s'agit, par exemple, dans les amplificateurs à plusieurs étages, de faire transmettre par chaque tube à la grille du tube suivant des tensions variables de plus en plus fortes.

La charge de plaque de tels amplificateurs peut être constituée par une très forte impédance, l'intensité du courant anodique pouvant, dans ces conditions, être très faible.

Le rapport entre les variations de tension recueillies aux bornes de la charge de plaque d'un tube (sortie) et les variations de tension appliquées à sa grille (entrée) exprime le gain d'amplification en volts du tube.

— Soit une *amplification en puissance*, quand il s'agit, par exemple, dans un récepteur, de faire développer aux signaux détectés une énergie suffisante pour faire vibrer la membrane d'un haut-parleur.

Dans ce cas, la charge de plaque des tubes amplificateurs doit être le siège de variations de courant importantes.

A) *EMPLOI D'UNE RESISTANCE COMME CHARGE DE PLAQUE*

Soit (figure 60) une triode comportant comme charge de plaque une résistance de 10 000 ohms.

Si nous polarisons la grille à — 3 volts au moyen de la batterie B, et si nous appliquons entre a et b un signal alternatif de 1 volt d'amplitude, la variation de courant plaque correspondante (figure 61), soit 4 milliampères pour cette lampe, produira une variation de tension de 40 volts aux bornes a' et b' de la résistance.

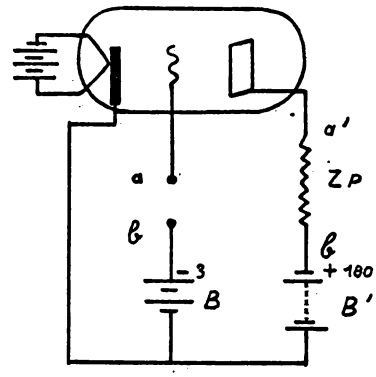


Fig. 60

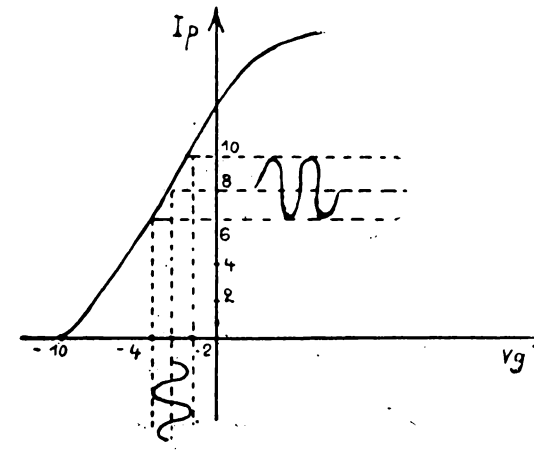


Fig. 61

Nous voyons ainsi que, lorsque la tension d'un signal appliqué à la grille de la lampe varie de 2 volts, il s'en suit une variation de tension de 40 volts dans le circuit de plaque. La tension du signal a été amplifiée 20 fois.

B) *EMPLOI D'UNE SELF COMME CHARGE DE PLAQUE*

L'emploi d'une forte résistance comme charge de plaque présente l'inconvénient de réduire la tension continue appliquée à la plaque par la batterie B' et de réduire ainsi l'amplification du tube : la caractéristique dynamique IpVg est très différente de la caractéristique statique ; le gain de la lampe est inférieur au coefficient d'amplification.

Pour réduire cette perte de tension de plaque, on emploie souvent comme charge de plaque (figure 62) une bobine de self présentant une réactance élevée à la fréquence du signal à amplifier, mais ayant une faible résistance ohmique. Les variations du courant de plaque feront apparaître entre ses bornes des différences de tension élevées, cependant que la tension continue appliquée à la plaque sera peu abaissée. L'amplification du tube sera augmentée.

C) *EMPLOI D'UN CIRCUIT ACCORDE COMME CHARGE DE PLAQUE*

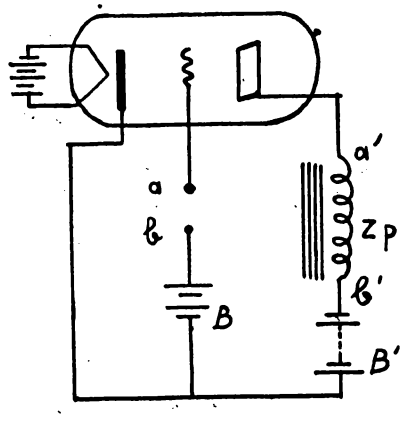


Fig. 62

Pour amplifier un signal de fréquence bien déterminée on emploiera comme charge de plaque un circuit résonant parallèle accordé sur cette fréquence (figure 63). Comme l'impédance offerte par ce circuit sera très élevée à la fréquence de résonance, la tension du signal à ses bornes sera très élevée (emploi à l'amplification en tension) ; d'autre part, à la résonance il est traversé par un courant assez fort (emploi à l'amplification en puissance). On peut réaliser par l'emploi du circuit accordé comme charge de plaque une amplification très sélective, très employée en H.F.

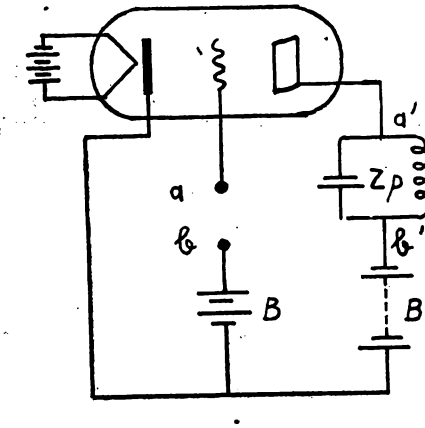


Fig. 63

AMPLIFICATEURS

L'amplification est une fonction très générale utilisée en radioélectricité tant à l'émission qu'à la réception. Les tubes amplificateurs et leurs montages seront assez variés suivant la fonction exacte qu'ils devront remplir. Enumérons rapidement ces différentes fonctions :

A) *A L'EMISSION*

— Dans les émetteurs, la puissance H. F. engendrée à l'étage oscillateur est généralement trop faible pour permettre à l'antenne de rayonner à grande distance. Aussi des *étages amplificateurs de puissance H. F.* sont-ils utilisés pour élever la puissance au niveau désiré.

— La tension de sortie B. F. d'un microphone est trop faible pour que celui-ci puisse servir d'étage modulateur à un émetteur de radiotéléphonie : des *étages amplificateurs de tension B. F.* sont utilisés pour accroître la tension de sortie du microphone, suffisamment pour obtenir une bonne modulation.

B) *A LA RECEPTION*

— Des *amplificateurs de tension H. F.* sont nécessaires dans les récepteurs pour accroître l'amplitude des signaux faibles reçus par l'antenne de façon à obtenir un bon rendement du détecteur, en particulier lorsque la détection se fait par diode.

— Des *amplificateurs de tension B. F.* sont employés pour amplifier les signaux B. F. obtenus à la sortie du détecteur avant de les appliquer à l'écouteur.

— Lorsque la réception doit se faire par haut-parleur, il est employé un *amplificateur de puissance B.F.*

DIFFERENTS MONTAGES D'AMPLIFICATEURS

Les amplificateurs diffèrent encore entre eux par le procédé de couplage utilisé pour relier leur circuit de sortie à l'entrée de l'étage suivant ou à l'appareil d'utilisation.

Le couplage peut être soit électrostatique soit électromagnétique.

Le couplage électrostatique est utilisé uniquement dans l'amplification en tension (liaison entre deux étages amplificateurs), tandis que le couplage électromagnétique peut permettre soit l'amplification en tension soit l'amplification en puissance.

La combinaison de ces deux modes de couplage avec les différentes charges de plaque donne tout une gamme possible de montages amplificateurs dont nous allons donner quelques exemples.

A) *COUPLAGE ELECTROSTATIQUE*

Il est réalisé par un *condensateur de liaison* dont la capacité doit être adaptée aux fréquences à laisser passer (elle doit être d'autant plus forte que les fréquences sont plus basses).

Ce condensateur est souvent aussi appelé *condensateur de blocage*, empêchant la tension continue de plaque du premier tube d'être appliquée à la grille du tube suivant.

1. — *Amplificateurs à résistance* (figure 64)

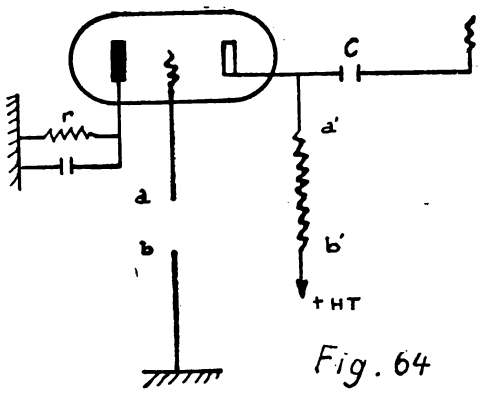


Fig. 64

Ce type d'amplificateur ne comportant aucun facteur de sélectivité donne une amplification indépendante de la fréquence des signaux à amplifier : il convient donc particulièrement lorsque la bande de fréquences des signaux à amplifier est large, par exemple en basse fréquence (différentes fréquences correspondant aux différents sons comprises environ entre 50 et 10 000 cycles/seconde). Cependant le gain obtenu est assez faible et décroît rapidement quand la fréquence du signal à amplifier augmente.

2. — *Amplificateurs à réactance de self-induction* (figure 65)

La charge de plaque du premier tube amplificateur est constituée par une bobine de self présentant une forte réactance à la fréquence des signaux à amplifier. Ce type d'amplificateurs est utilisé surtout dans les circuits H. F. des émetteurs.

En basse fréquence, il favoriserait l'amplification des notes aigues (fréquences musicales élevées) au détriment des notes graves.

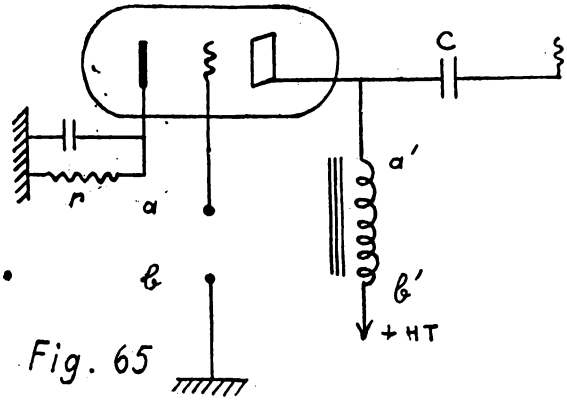


Fig. 65

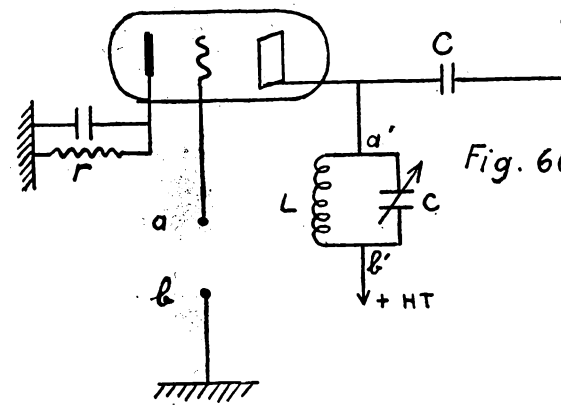


Fig. 66

3. — *Amplificateurs à circuit accordé* (figure 66)

La charge de plaque du premier tube amplificateur est constituée par un circuit antirésonant présentant une très forte impédance aux signaux ayant la fréquence sur laquelle il est réglé.

Ce type d'amplificateurs est utilisé dans les émetteurs à l'amplification H. F. : il permet d'obtenir une forte amplification à la fréquence sur laquelle le circuit antirésonant est accordé.

B) *COUPLAGE ELECTROMAGNETIQUE*

1. — *Amplificateurs à transformateur* (figure 67)

Le tube amplificateur a comme charge de plaque le primaire d'un transformateur dont le secondaire est monté dans le circuit de grille du tube suivant ou dans l'appareil d'utilisation, haut-parleur par exemple.

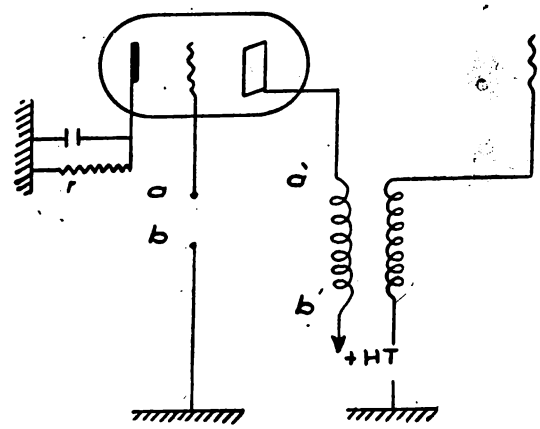


Fig. 67

Ce type d'amplificateur permet donc soit l'amplification en tension soit l'amplification en puissance ; dans le premier cas le transformateur est un élévateur de tension (rapport de transformation : 3 à 5 en général) ; dans le deuxième cas le transformateur est un abaisseur de tension.

Les amplificateurs à transformateur sont utilisés tant en H. F. qu'en B. F. : dans ce dernier cas les transformateurs sont à noyau de fer.

2. — *Couplage électromagnétique à un seul circuit accordé*

Ce montage (figure 68) est caractéristique des amplificateurs H. F. que l'on monte dans la plupart des récepteurs.

3. — *Couplage électromagnétique à deux circuits accordés*

Ce couplage (figure 69), très sélectif, est utilisé à l'amplification H. F. dans les émetteurs et à l'amplification moyenne fréquence dans les récepteurs superhétérodynes.

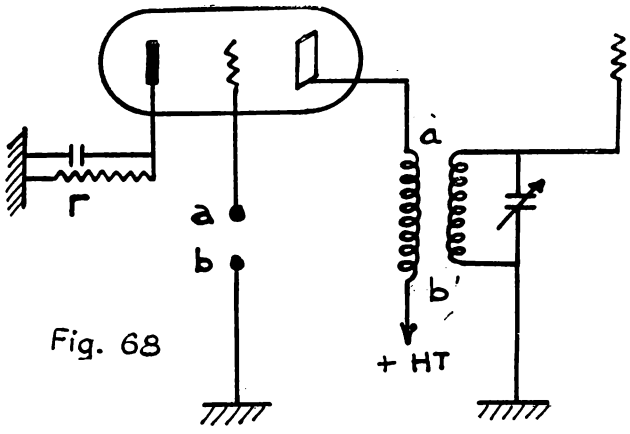


Fig. 68

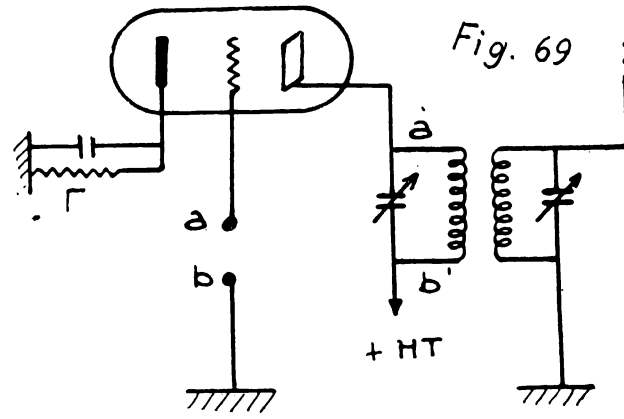


Fig. 69

CLASSES D'AMPLIFICATION

Selon la polarisation choisie pour la grille de commande d'un tube amplificateur, il est possible d'admettre à l'entrée un signal plus ou moins fort, ce qui permet, en utilisant soit la totalité soit seulement une partie des oscillations, d'obtenir une amplification plus ou moins grande. Les amplificateurs ont été classés en fonction de ce critérium en trois classes, A, B et C.

A) *AMPLIFICATEURS CLASSE A* (figure 70)

Le potentiel de polarisation de la grille est choisi de façon telle que le fonctionnement du tube soit limité à la partie rectiligne de la caractéristique IpVg.

Si le signal d'entrée n'est pas trop fort, les variations de courant plaque reproduisent exactement les variations de tension grille : il n'y a pas de *distorsion.* Ces amplificateurs sont donc caractérisés par leur grande fidélité.

B) *AMPLIFICATEURS CLASSE B* (figure 71)

La grille d'un tube amplificateur fonctionnant en classe B est polarisée au « cut off ». Le courant

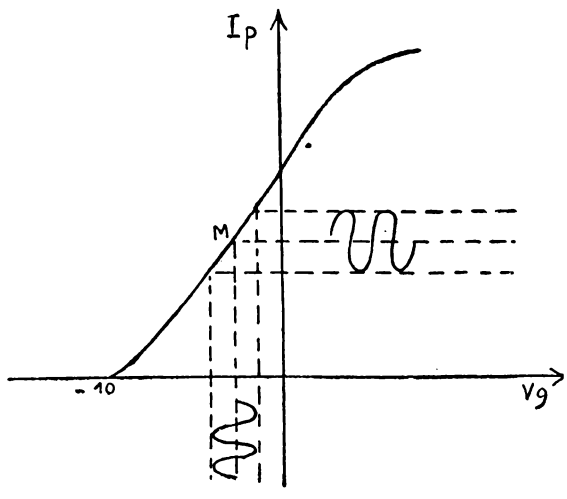


Fig. 70

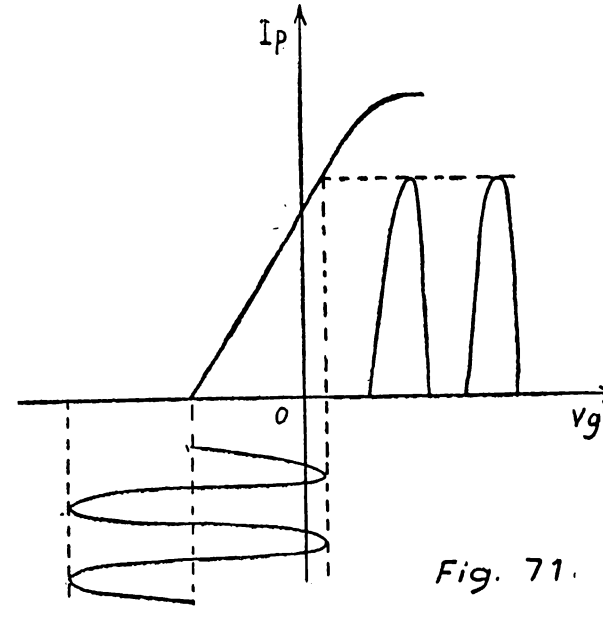


Fig. 71

plaque ne passe que pendant les alternances positives du signal appliqué à la grille. Si le signal à amplifier est sinusoïdal, les variations du courant anodique sont représentées par des demi-sinusoïdes.

En montant en « push-pull » (figure 72) deux tubes fonctionnant en classe B, on amplifiera la totalité du signal sans distorsion appréciable, chacun des deux tubes, montés symétriquement, amplifiant une alternance.

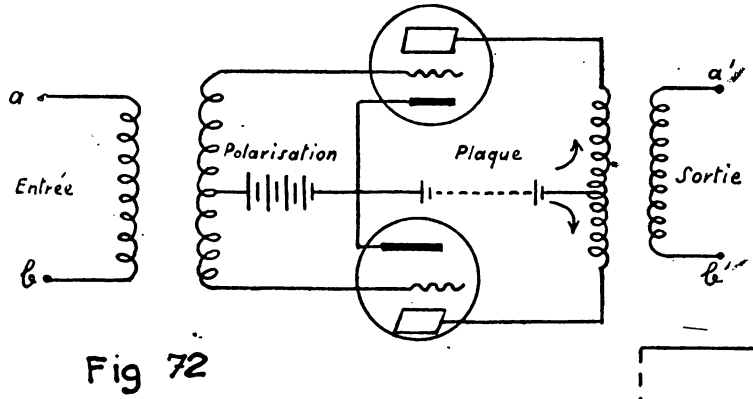


Fig 72

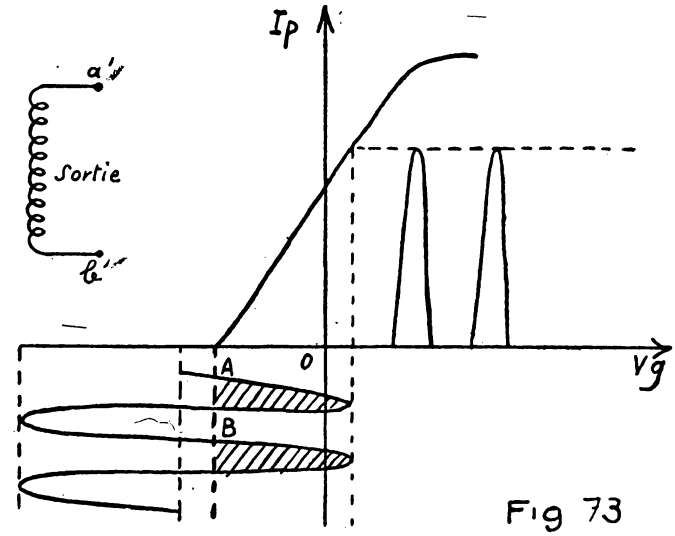


Fig 73

C) *AMPLIFICATEURS CLASSE C* (figure 73)

La grille d'un tube fonctionnant en classe C est polarisée au-dessous du « cut off ». Le courant anodique n'apparaît que pendant une fraction d'une des deux alternances du signal : fraction AB correspondant aux sommets positifs de la tension alternative du signal d'entrée : il faut évidemment que celui-ci ait déjà une amplitude assez grande.

Les variations de courant anodique obtenues sont maxima.

CHAPITRE VI

OSCILLATEURS

La lampe triode permet l'entretien d'oscillations H. F. dans un circuit oscillant.

Plaçons dans le circuit de plaque d'une triode un circuit oscillant monté en parallèle (figure 74). Si on met la lampe en service, dès que la cathode est chaude il passe un courant plaque, le condensateur C se charge puis se décharge : il se produit dans le circuit oscillant une oscillation amortie de période : $T = 2\pi \sqrt{LC}$.

Pour entretenir cette oscillation, il faudrait pouvoir faire passer dans L, au moment voulu, un courant I, qui apporterait au circuit le complément d'énergie nécessaire pour y compenser les pertes.

Plaçons dans le circuit de grille du tube une bobine de self L' couplée à L. L'oscillation amortie produit dans L des variations de courant qui induisent aux bornes de L' une différence de potentiel : celle-ci, appliquée à la grille, fait varier le courant plaque.

Selon le sens d'enroulement de L' par rapport à L, ces variations de courant sont à un instant t positives ou négatives. Nous sommes donc maîtres d'une part de leur sens, d'autre part de leur valeur absolue en faisant varier le coefficient d'induction mutuelle des deux bobines (variation du couplage). Il y aura une position pour laquelle l'entretien des oscillations du circuit LC sera réalisé : apport d'énergie suffisant au moment voulu. Nous avons réalisé un oscillateur.

La bobine L' est dite « bobine d'entretien ».

Le fonctionnement serait le même si le circuit oscillant était placé dans le circuit de grille (fig. 75). L'essentiel est qu'il y ait « réaction » entre circuit de plaque et circuit de grille.

Le couplage entre circuit de plaque et circuit de grille au lieu de se faire par induction, peut être électrostatique (figure 76) : il est réalisé par un condensateur C_1 de capacité telle que, combinée à L', elle donne une fréquence inférieure à la fréquence de résonance du circuit oscillant.

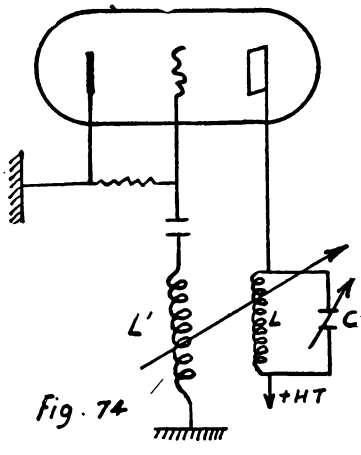


Fig. 74

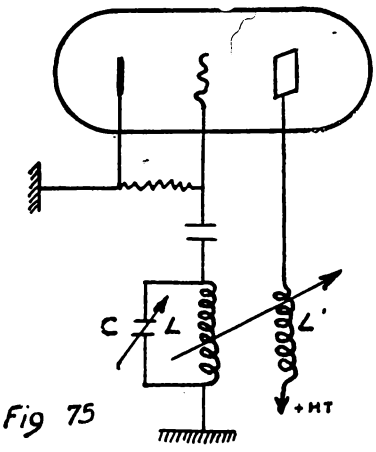


Fig 75

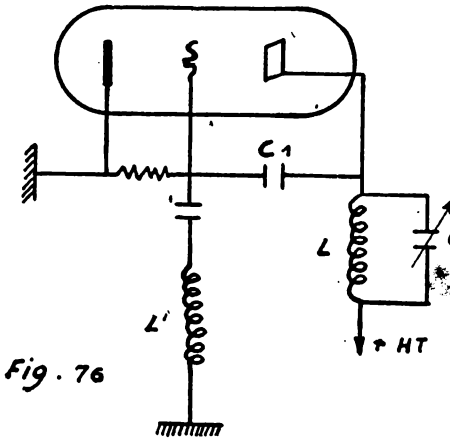


Fig. 76

Il existe toute une gamme de montagnes oscillateurs différant les uns des autres par le mode de prélèvement dans le circuit de plaque de la tension appliquée à la grille : montage Hartley ou à autotransformateur (fig. 77), montage Colpitts (fig. 78) etc.

Remarque 1

Sur la figure 76 nous avons représenté un oscillateur dans lequel le couplage entre le circuit plaque et le circuit de grille est réalisé par une petite capacité C_1.

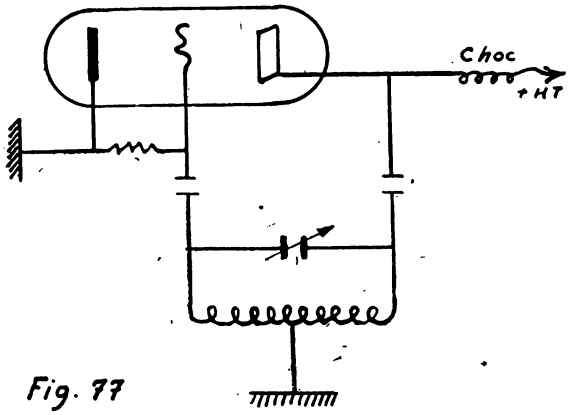


Fig. 77

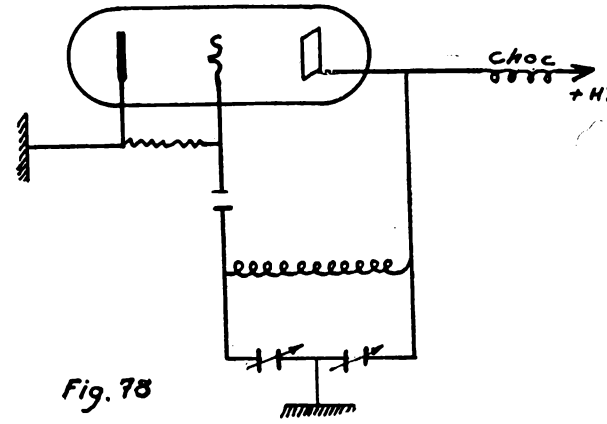


Fig. 78

Dans les amplificateurs H. F. la capacité parasite grille-plaque, dont nous avons signalé l'existence dans l'étude de la triode, peut jouer, à fréquence élevée, le rôle de ce condensateur C_1. C'est ce qui explique l'amorçage d'oscillations parasites se produisant parfois dans les amplificateurs H. F. On évite cet inconvénient, comme nous l'avons déjà dit, par l'emploi de grilles-écrans supprimant la capacité parasite entre anode et grille de commande (emploi de tubes tétrodes et pentodes dans les amplificateurs H. F.).

Remarque 2 — *Stabilité des oscillations*

Lorsque le montage d'un oscillateur est correctement réalisé, les oscillations produites sont parfaitement stables en amplitude. En effet, l'amplitude des oscillations, très faible en début de fonctionnement, croît très rapidement entraînant une augmentation des variations de tension grille qui tendent à l'augmenter encore et ainsi de suite.

Mais l'amplitude des oscillations atteint rapidement une limite en vertu des propriétés de la lampe triode (courant de saturation) et des pertes par effet joule devenant de plus en plus élevées au fur et à mesure que l'amplitude des oscillations augmente. Il s'établit donc rapidement un régime d'équilibre, stable.

Remarque 3 — *Polarisation de la grille*

La polarisation de la grille d'un tube fonctionnant en oscillateur se fait en général par « fuite de grille », c'est-à-dire par une résistance monté entre la grille et la masse, comme nous l'avons représenté sur les figures 74 à 78.

La polarisation par résistance de cathode n'est guère utilisée que dans les petits oscillateurs locaux montés dans les récepteurs (hétérodyne et oscillateur local du superhétérodyne).

Lorsqu'un oscillateur doit fournir une certaine puissance, la polarisation est fournie par une petite source de courant continu.

MAITRE-OSCILLATEUR

Dans un émetteur, la fréquence à laquelle oscille un système comme ceux que nous venons d'étudier n'est pas stable lorsque :

— le circuit est couplé à une antenne : dans ce cas, la période propre de l'antenne modifie celle de l'ensemble et ceci d'une façon variable (vent, trépidations) ;

— la puissance de la lampe oscillatrice est importante (variations de température, déformation mécaniques).

Cependant la stabilité en fréquence d'un émetteur est indispensable pour réaliser des communications faciles sans brouillage des autres stations. Le poste émetteur comporte alors :

— un petit oscillateur dit « maître-oscillateur » ou « oscillateur-pilote », dont le rôle est non pas de donner de la puissance, mais une fréquence bien stable ;

— un amplificateur de puissance qui, recevant les oscillations stables, les amplifie et les transmet à l'antenne qui ne peut plus alors influencer le maître-oscillateur.

PILOTAGE PAR QUARTZ

Le quartz (bi-oxyde de silicium) présente les propriétés, dites *piézo-électriques*, suivantes :

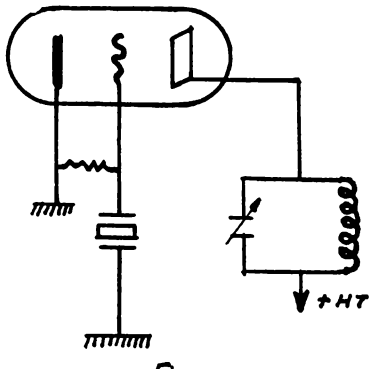


Fig. 79

1°) Si on le comprime, apparaissent sur ses faces des charges électriques d'un certain signe ; si on le dilate, ces charges sont de signe contraire ;

2°) Si on applique sur les faces d'une lamelle de quartz une différence de potentiel alternative à haute fréquence, le cristal se met à vibrer mécaniquement à une fréquence qui lui est propre et cette vibration mécanique engendre entre ses faces des oscillations électriques à la même fréquence. Celle-ci dépend de l'épaisseur de la lame :

$$\lambda \text{ (mètres)} = 104 \times e \text{ (millimètres)}$$

Une lamelle de quartz peut donc remplacer un circuit oscillant : à température constante sa fréquence d'oscillation est rigoureusement constante.

On voit immédiatement l'intérêt du quartz qui va permettre des communications sur des fréquences préréglées : il suffira, par un jeu de poussoirs, de remplacer un quartz par un autre (poste SCR 508).

Le quartz est monté dans le circuit grille du maître-oscillateur (figure 79). Le couplage entre circuit grille et circuit plaque est réalisé par la capacité grille-plaque du tube.

CHAPITRE VII

MODULATION

Jusqu'à présent nous avons parlé seulement d'ondes amorties et d'ondes entretenues ; les unes et les autres peuvent nous permettre de transmettre des messages en code Morse tout simplement en établissant et coupant l'émission à l'aide d'un manipulateur.

Mais comment réaliser des communications radiotéléphoniques, c'est-à-dire transmettre la parole ou la musique ?

Les courants électriques de basse fréquence qui correspondent aux sons perceptibles par notre oreille ne sont pas susceptibles de rayonner. Le but de la *modulation* est d'assurer le transport hertzien de ces oscillations de basse fréquence. Pour cela on les combine à une oscillation de haute fréquence capable de rayonner et dont la forme subira des modifications déterminées par les caractéristiques des sons à transporter.

Ces modifications peuvent porter :

— soit sur l'amplitude de l'oscillation HF : *modulation en amplitude :*

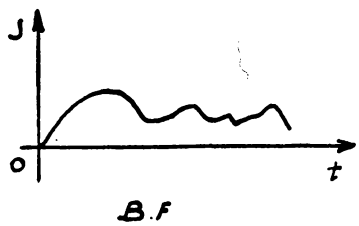
— Soit sur la fréquence de l'oscillation HF : *modulation de fréquence.*

L'oscillation H.F. est appelée « porteuse ».

A) *MODULATION EN AMPLITUDE*

Un microphone donne des variations d'intensité dans son circuit s'il est soumis aux vibrations sonores produites par la voix ou la musique. Comme nous l'avons dit, ce sont des vibrations de basse fréquence (50 à 10 000 périodes par seconde environ) très inférieures aux fréquences hertziennes (fig. 80).

Pour réaliser une émission radiotéléphonique par modulation en amplitude, il faut faire varier l'amplitude de l'oscillation entretenue H.F. émise, à la fréquence des oscillations de basse fréquence produites par le microphone (figure 81).



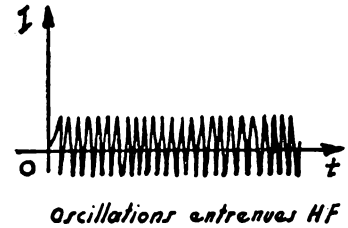


Fig. 80

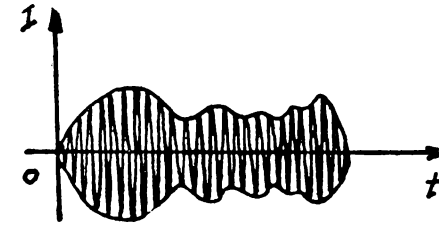


Fig. 81

Ce résultat est obtenu en faisant varier, par application de la basse fréquence, la tension de l'une des électrodes du tube amplificateur de puissance de l'émetteur, par exemple, la tension plaque au point A (figure 82).

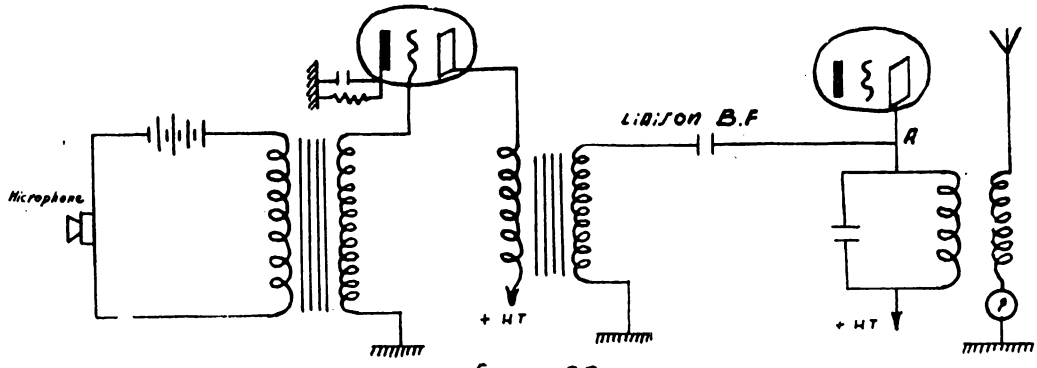


Fig. 82

Un émetteur radiotéléphonique complet comportera les éléments représentés par le schéma de principe de la figure 83.

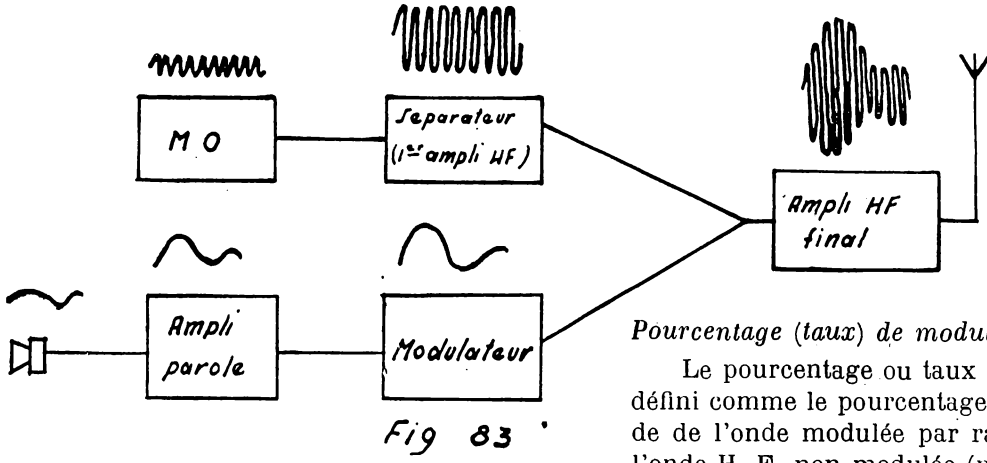


Fig 83

Pourcentage (taux) de modulation

Le pourcentage ou taux de modulation peut être défini comme le pourcentage de variation d'amplitude de l'onde modulée par rapport à l'amplitude de l'onde H. F. non modulée (porteuse).

Il est important, pour avoir une bonne transmission, que ce pourcentage soit élevé, car plus est grande la variation d'amplitude de l'onde modulée plus sera intense le courant détecté dans le récepteur.

Le pourcentage de modulation maximum admissible est de 100%.

Méthodes de modulation

Au lieu d'être appliquée à la plaque du tube amplificateur de puissance de l'émetteur, la basse fréquence pourrait être appliquée à l'une de ses grilles. Le rendement est plus faible ; aussi la modulation plaque est-elle la plus couramment employée.

B) *MODULATION DE FREQUENCE*

Un deuxième procédé, plus récent et un peu plus compliqué, est celui de la modulation de fréquence. Le principe en reste toutefois très simple.

Ce qui, dans un émetteur, fixe la fréquence émise (l'onde porteuse), c'est la fréquence sur laquelle est réglé le circuit oscillant de l'oscillateur : $F = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$.

Donc, si l'on trouve le moyen de faire varier L ou C en fonction de la parole ou de la musique, N variera et on aura modulé la fréquence.

Soit (figure 84) un oscillateur dont la fréquence est fixée par les valeurs de C_1 et de L. Disposons en parallèle sur C_1 un microphone M constitué par un condensateur. Lorsqu'on parle devant la lame avant, elle vibre : sa distance à la deuxième varie ; la capacité de l'ensemble varie donc : la somme de cette capacité C_m et de celle C_1 du circuit oscillant variera ; or $F = \frac{1}{2\pi \sqrt{L\,(C_1 + C_m)}}$. Nous avons réalisé la modulation de fréquence (figure 85). Lorsque la lame avant du microphone vibre, on obtient des fréquences alternativement plus hautes et plus basses que la fréquence de repos (en l'absence de toute modulation). La fréquence audible du signal sonore détermine le nombre de fois par seconde que la fréquence d'oscillation varie entre sa valeur maxima et sa valeur minima.

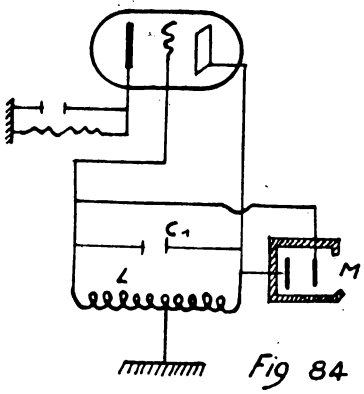


Fig 84

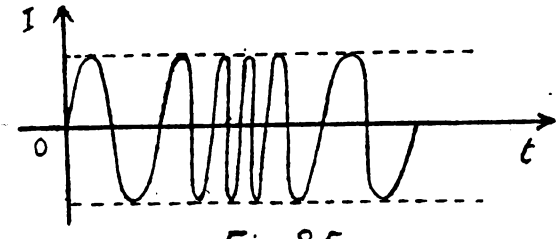


Fig. 85

L'intensité du signal sonore détermine l'amplitude de variation de la fréquence de part et d'autre de la fréquence de repos : on l'appelle « déviation ». Dans la pratique, la déviation maxima allouée à chaque transmission est de 40 kilocycles de part et d'autre de la fréquence de repos.

Il existe un autre procédé de modulation de fréquence que nous mentionnerons seulement pour mémoire : le système modulateur à réactance de tube.

Avantages et inconvénients de la modulation de fréquence

— Le plus sérieux avantage de la modulation de fréquence est l'élimination des parasites à la réception. En effet, les parasites modulent une onde en amplitude : on les éliminera en ramenant l'onde reçue à son amplitude normale, avant détection, dans un dispositif appelé « limiteur ». (figure 85 bis).

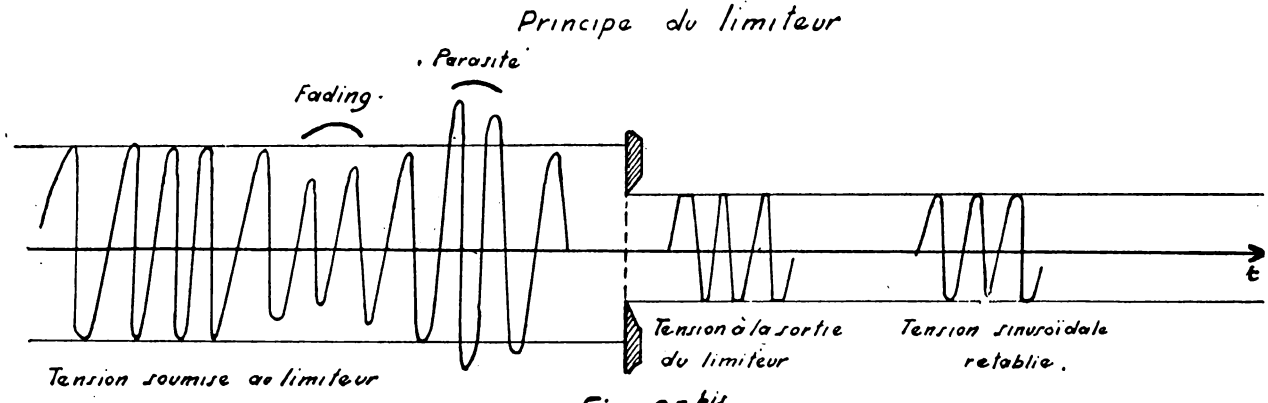


Fig. 85 bis

— Un deuxième avantage sérieux est le travail à amplitude constante quelle que soit la modulation, permettant de faire fonctionner les tubes des différents étages avec leur rendement maximum.

— Le principal inconvénient de la modulation de fréquence consiste en la large bande de fréquences (100 kilocycles) nécessaire à une seule transmission. Cela limite l'emploi de la modulation de fréquence aux ondes très courtes (fréquences supérieures à 20 mégacycles).

— Les récepteurs sont plus compliqués que ceux destinés à recevoir les ondes modulées en amplitude.

CHAPITRE VIII

DETECTION

I. - DETECTION DES ONDES MODULEES

L'antenne d'un récepteur de radiotéléphonie reçoit des ondes modulées ayant la forme représentée par la figure 86.

L'objet de la détection est d'obtenir un courant variable qui suive les variations d'amplitude à basse fréquence de l'onde reçue, courant B. F. qui fera vibrer la plaque de l'écouteur à la fréquence du son qui a produit la modulation à l'émission.

Or les courants induits dans l'antenne ne peuvent donner aucun son dans un écouteur téléphonique ou un haut-parleur. En effet, à un instant t_0 quelconque (figure 86), la somme des courants B.F. est nulle et aucun courant ne sollicitera la plaque de l'écouteur téléphonique dont l'inertie est par ailleurs trop grande pour lui permettre de suivre les variations du courant H. F.

Il faut donc procéder à un redressement du signal (figure 87) : il suffira ensuite de séparer dans le circuit du détecteur, par filtrage, la composante H.F. de la composante B.F., qui sera appliquée à l'écouteur.

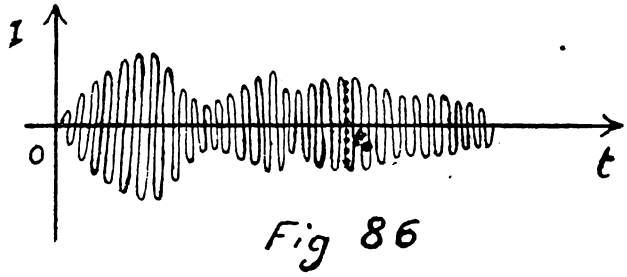


Fig 86

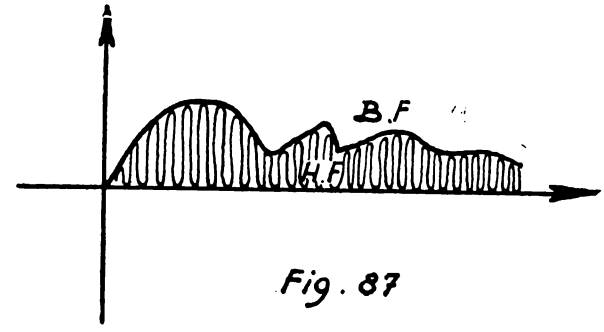


Fig. 87

A) *DETECTION PAR DIODE*

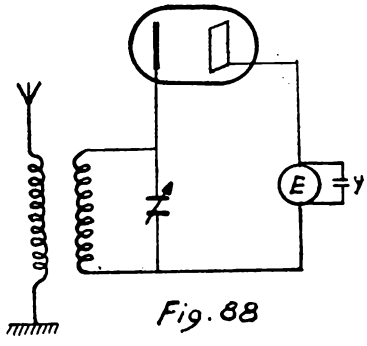


Fig. 88

Branchons le circuit de réception, couplé à l'antenne et accordé sur la fréquence porteuse de l'onde à recevoir, dans le circuit d'une diode (figure 88).

La diode, ne laissant passer le courant que dans un seul sens, supprime une alternance du signal reçu (figure 87). Sur la plaque de l'écouteur E, branché dans le circuit de la lampe, agira alors la variation d'amplitude à basse fréquence de l'onde porteuse, variation qui reproduira les vibrations sonores ayant fourni la modulation à l'émission.

Nous avons « détecté » ou « démodulé » le signal reçu par l'antenne.

Le condensateur γ, branché aux bornes de l'écouteur, détourne de celui-ci la composante H.F. du signal détecté.

B) *DETECTION PAR TRIODE*

La lampe diode est un excellent détecteur, mais elle n'amplifie pas le signal détecté et, empruntant de l'énergie au circuit de réception, augmente son amortissement, ce qui diminue l'intensité du courant de résonance, donc la sensibilité et la sélectivité du récepteur.

Dans un récepteur employant la détection diode il est donc nécessaire d'utiliser plusieurs étages d'amplification (avant et après détection).

Si un poste récepteur ne doit employer qu'un petit nombre de tubes et n'avoir, par conséquent, que très peu d'étages d'amplification, il y a intérêt à employer un détecteur plus sensible, en d'autres termes, un détecteur qui amplifiera le signal aussi bien qu'il le détectera. La lampe triode, employée comme détecteur, remplit cette condition.

1. — *Détection grille* (figure 89)

Nous pouvons considérer l'ensemble cathode-grille comme constituant une diode, et, par conséquent ce sont des signaux détectés (d'un seul sens) qui circulent dans le circuit cathode-grille. Les variations d'intensité dans ce circuit produisent une chute de potentiel variable dans la résistance Rd. Le potentiel de grille suit donc les variations du signal détecté.

Il s'en suit que le flot d'électrons allant vers la plaque, c'est-à-dire le courant plaque, suit ces mêmes variations et les reproduit amplifiées.

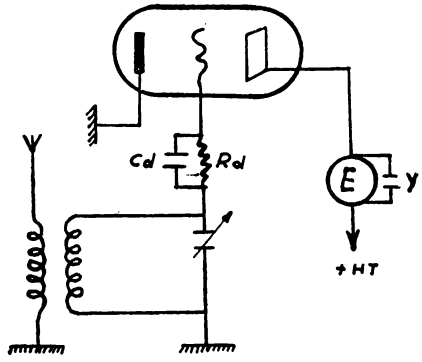


Fig. 89

La triode joue donc deux rôles :

— Cathode et grille = une diode détectrice ;

— grille et plaque = une triode amplificatrice.

REMARQUES. — Dans ce montage, la tension de polarisation de la grille de la triode est fournie par le passage du signal détecté dans la résistance Rd ; lorsque le signal reçu est fort, cette polarisation augmente, ce qui a pour conséquence, en amenant le point moyen de fonctionnement de l'amplificateur vers la partie courbe de la caractéristique Ip—Vg (au voisinage du cut-off), de réduire l'amplification et de produire de la distorsion.

La détection grille est sensible et favorise les signaux faibles ; elle a été très utilisée dans les postes récepteurs élémentaires à une seule lampe.

La résistance Rd a en général une valeur de 1 à 5 mégohms.

Le condensateur Cd doit écouler la H. F. tout en bloquant la composante B. F. du signal : sa capacité est de l'ordre du cent millième de microfarad. L'ensemble Rd-Cd est souvent appelé « bloc détecteur » : sa présence est caractéristique de la détection grille.

2. — *Détection plaque* (figure 90)

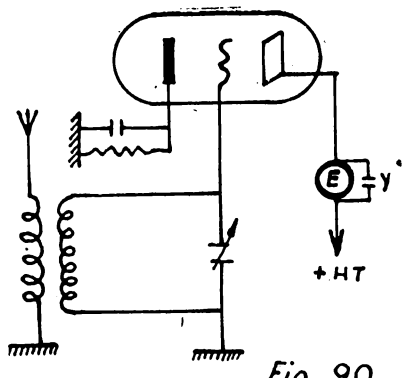


Fig. 90

La grille de la triode est fortement polarisée de façon que l'une des alternances du signal reçu ne produise pas de courant : il y a détection (figure 91).

La valeur moyenne du courant anodique augmente si l'intensité du signal reçu augmente : le meilleur rendement est donc obtenu avec des signaux assez forts. La détection plaque, peu sensible aux signaux faibles, nécessite donc une amplification préalable.

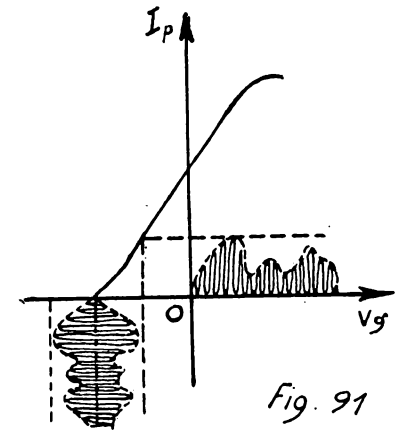


Fig. 91

DETECTION DES ONDES MODULEES EN FREQUENCE

Les procédés de détection que nous venons de décrire ne s'appliquent qu'aux ondes modulées en amplitude. Quand à la démodulation d'une onde modulée en fréquence, elle consiste à produire une variation de courant fonction de la variation de fréquence, donc à fréquence audible.

Une onde modulée en fréquence varie de + ΔF_o à — ΔF_o autour de la fréquence de repos F_o. Si à la réception nous avons un circuit oscillant accordé sur F_o, il est en résonance sur cette fréquence de repos : le courant y sera donc maximum, alors qu'il diminuera si le signal reçu s'écarte de F_o. Donc les variations de fréquence de — ΔF_o à + ΔF_o entraîneront bien des variations de courant que l'on pourra utiliser dans un appareil de reproduction de sons, casque ou haut-parleur.

Le montage utilisé s'appelle *discriminateur.*

II. - DETECTION DES ONDES ENTRETENUES PURES

Les montages détecteurs que nous venons d'étudier servent à détecter les signaux modulés en séparant les fréquences audibles des hautes fréquences. Ces détecteurs pourront bien redresser les ondes entretenues pures, mais ils ne feront apparaître aucun courant B.F. dans leurs circuits de sortie, étant donné qu'il n'y a aucune tension B.F. dans un signal non modulé : un écouteur téléphonique ou haut-parleur branché dans leur circuit de sortie ne fonctionnera pas.

HETERODYNE

Pour recevoir des signaux en ondes entretenues pures, il faut faire apparaître une tension B.F. dans le circuit du détecteur. Il faut, en quelque sorte, moduler localement des ondes reçues : ceci est réalisé grâce à « *l'hétérodyne* », petit oscillateur situé dans le récepteur.

On règle l'hétérodyne sur une fréquence F' voisine de celle des signaux à détecter : F.

Si ceux-ci ont une fréquence de 1 000 kilocycles, l'hétérodyne sera réglée par exemple sur 1 001 kilocycles : il en résultera, par superposition de ces deux fréquences, *des battements* à 1 kilocycle qui, après détection, seront audibles et donneront dans l'écouteur un son de fréquence 1 000. ,

F' — F = F'' (basse fréquence): (figure 92).

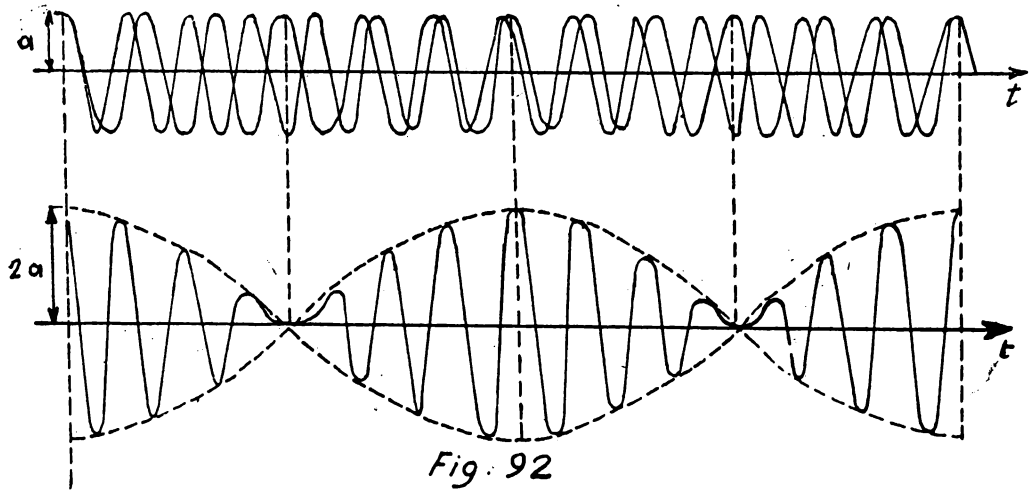


Fig. 92

En faisant varier la fréquence d'oscillation de l'hétérodyne, l'opérateur peut déterminer la hauteur du son la plus propice à une bonne réception. S'il prenait, par exemple, F' = 1 002 kilocycles, il entendrait dans l'écouteur un son de fréquence 2 000.

DETECTRICE A REACTION

La lampe triode fonctionnant en « détectrice à réaction » rend possible la détection des ondes entretenues pures : nous allons voir comment.

C'est une triode, montée en détection grille, dans laquelle est réalisé un couplage entre circuit de plaque et circuit de grille. La « réaction » consiste dans le fait de prélever, grâce à ce couplage, une partie de la tension de sortie, et de la renvoyer dans le circuit d'entrée, de façon qu'elle s'ajoute à la tension du signal reçu : il faut pour cela qu'elle soit en phase avec lui, ce qui est réalisable par un couplage convenable. L'emploi de la réaction accroît beaucoup l'amplification du montage.

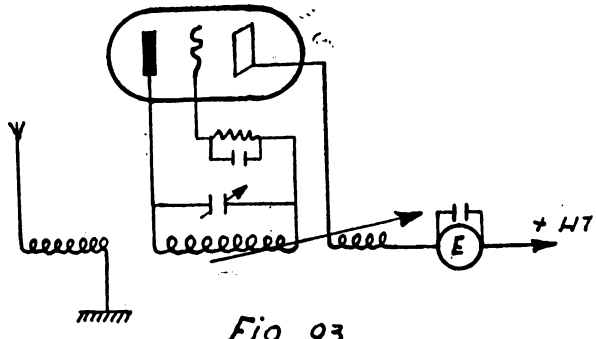


Fig. 93

En examinant le montage de la détectrice à réaction représenté par la figure 93, nous voyons que nous avons réalisé en fait le montage d'un tube oscillateur (cf. figure 75). Effectivement, pour un certain couplage entre circuit de plaque et circuit de grille, des oscillations entretenues prennent naissance dans le montage.

— Le couplage étant variable entre grille et plaque, la réception des ondes modulées (radiotéléphonie) se fera dans de bonnes conditions (maximum de sensibilité sans distorsion appréciable) en réglant le couplage au-dessous du point d'accrochage (point pour lequel la lampe commence à fonctionner en oscillatrice).

— Par contre, lorsque la lampe fonctionne en oscillatrice, la détection des ondes entretenues pures (radiotélégraphie) est possible, car la lampe remplace une hétérodyne : il faut, dans ce cas que le circuit d'accord soit réglé sur une fréquence légèrement différente de celle du signal à recevoir, la différence devant fournir une fréquence audible.

La détectrice à réaction est le détecteur le plus sensible ; elle permet de recevoir dans de bonnes conditions des signaux faibles : elle constitue le récepteur élémentaire type.

CHANGEMENT DE FREQUENCE — SUPERHETERODYNE

Un poste récepteur complet, destiné à recevoir les émissions de stations lointaines, par perfectionnement du récepteur élémentaire comportant une simple détectrice, comprendra les éléments suivants (figure 94) :

— un ou plusieurs étages amplificateurs H.F., accordés sur la fréquence de l'émission à recevoir ;
— un détecteur ;
— un ou deux étages amplificateurs B.F. ;
— un casque téléphonique ou un haut-parleur.

Fig. 94

Si nous dessinons le schéma simplement de la partie H.F., d'un tel récepteur (fig. 95), nous voyons que pour deux étages amplificateurs seulement il y aura six bobinages et trois condensateurs variables

à régler. D'autre part, les amplificateurs H.F. à plusieurs étages ne se prêtent pas sans difficultés à l'amplification des différentes gammes de fréquences. En particulier, lorsque les fréquences à amplifier deviennent assez élevées (gamme des ondes courtes), les faibles capacités existant entre les fils de connexion des organes de l'appareil et entre les électrodes des lampes peuvent dériver une notable fraction du courant H.F., ce qui diminue l'amplification ; ces capacités peuvent également créer dans les amplificateurs H.F. des régimes instables (oscillations parasites faisant apparaître des sifflements).

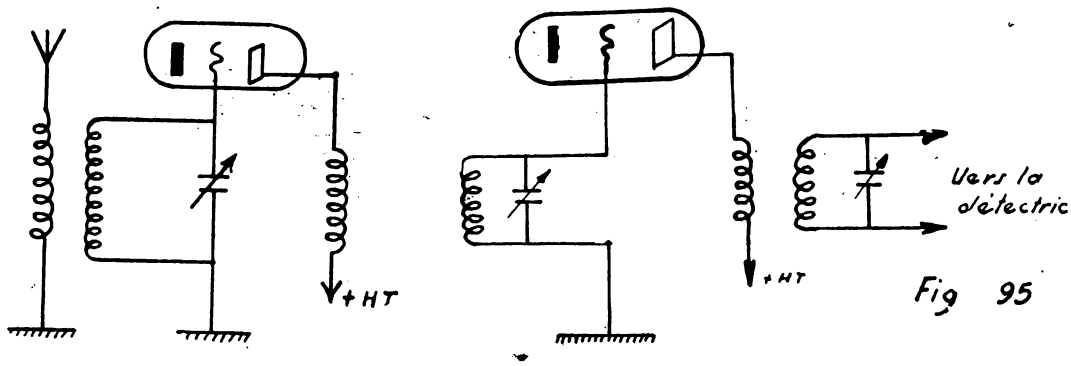


Fig 95

Pour pallier ces divers inconvénients et avoir des récepteurs à la fois sensibles et faciles à régler, on utilise le *changement de fréquence.*

Si F est la fréquence des signaux à recevoir, on fait interférer avec ceux-ci des oscillations entretenues de fréquence F_1 émises localement, de façon à obtenir des battements de fréquence $F_2 = F—F_1$. Pour recevoir une émission de fréquence F', on réglera la fréquence des oscillations locales de façon que F_2 reste la même : $F_2 = F' — F'_1 = F — F_1$. F_2 est appelée *moyenne fréquence* ou fréquence intermédiaire. Cette moyenne fréquence conserve au point de vue modulation les caractéristiques de la fréquence reçue. Ainsi on n'aura plus à amplifier avant détection que cette fréquence F_2 constante.

La constance de la moyenne fréquence est obtenue en commandant par la même manœuvre le condensateur d'accord du circuit de réception et le condensateur de réglage de l'oscillateur local (condensateurs en ligne).

La moyenne fréquence étant rigoureusement constante, on peut sans difficultés utiliser plusieurs étages amplificateurs réglés une fois pour toutes sur cette fréquence ; ils fonctionnent avec le rendement optimum et, d'autre part, les régimes instables ne sont plus à craindre au même degré qu'en haute fréquence.

Un poste récepteur à changement de fréquence (*superhétérodyne*) comprendra les éléments représentés schématiquement par la figure 96.

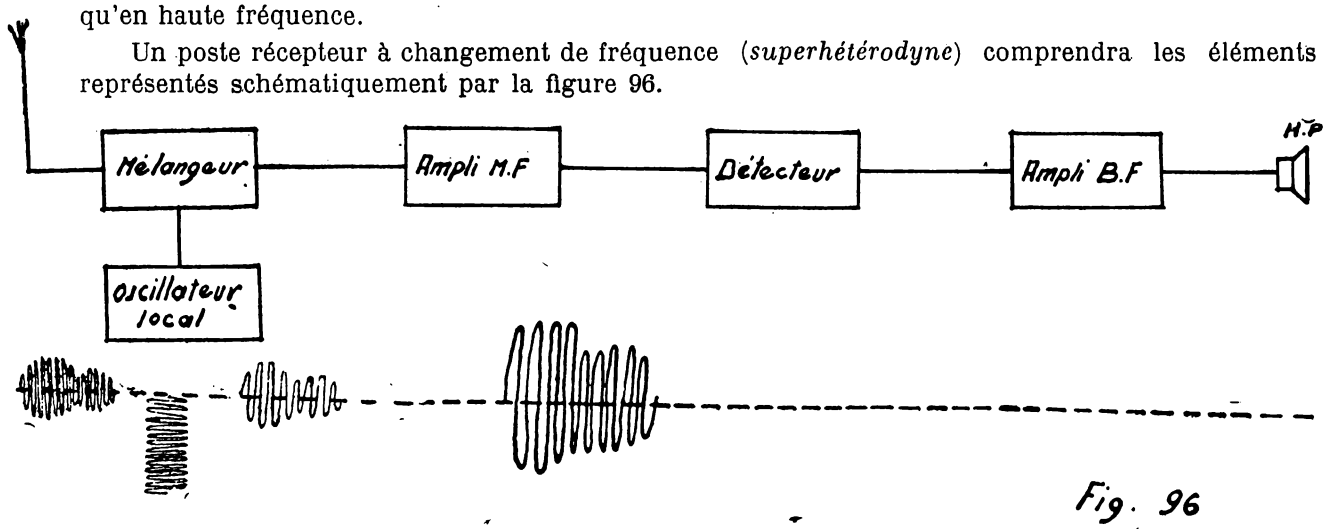


Fig. 96

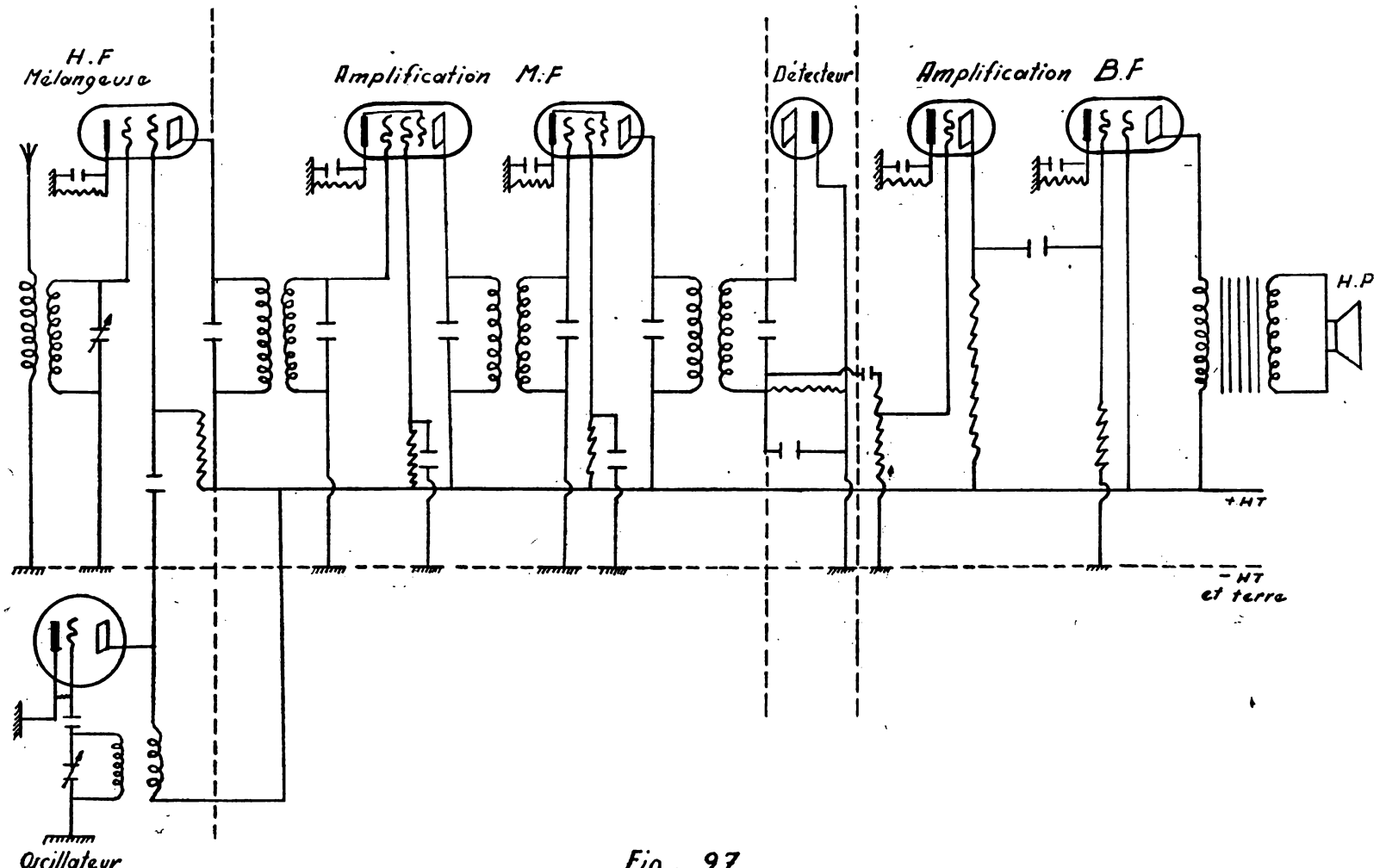

H.F
Mélangeuse
Amplification M.F
Détecteur
Amplification B.F
H.P
+HT
-HT
et terre
Oscillateur

Fig. 97

CHAPITRE IX

CONSTITUTION D'ENSEMBLE D'UN RECEPTEUR

Nous avons donné au chapitre II une idée de la constitution des récepteurs radioélectriques à partir du récepteur le plus simple comportant seulement une antenne, un détecteur et un écouteur téléphonique (récepteur élémentaire), et en indiquant la nécessité de le perfectionner, pour le rendre sensible aux signaux des stations émettrices lointaines, en lui ajoutant des étages d'amplification tant H. F. (avant détection) que B. F. (à la sortie du détecteur).

Un récepteur ainsi constitué est dit « poste à amplification directe » par opposition au poste superhétérodyne dont nous venons de voir le principe de fonctionnement au chapitre précédent. Nous avons entrevu les difficultés que l'existence de plusieurs étages d'amplification haute fréquence dans de tels postes créent dans leur mise au point et leur réglage. En raison de ces difficultés, tous les postes récepteurs sensibles utilisés aujourd'hui sont du type superhétérodyne. C'est donc ce type seul de récepteur que nous allons voir un peu plus en détail dans le présent chapitre.

La figure 96 indiquait schématiquement les principaux éléments constitutifs d'un récepteur superhétérodyne.

Nous avons représenté sur la figure 97 un poste superhétérodyne où se retrouvent ces différents éléments. C'est encore un schéma simplifié qui appelle quelques remarques, nécessaires pour donner une idée de la physionomie d'un récepteur moderne.

1. *ETAGES MELANGEUR, DETECTEUR, AMPLIFICATION B. F.*

— Nous avons réparti la réalisation du changement de fréquence entre deux tubes : une triode oscillatrice et une pentode mélangeuse (appelée aussi modulatrice). Dans de nombreux superhétérodynes modernes, un seul tube remplit les deux fonctions ; on a utilisé longtemps des heptodes ou des octodes, mais maintenant on emploie généralement une lampe triode-exode (fig. 98) qui, comme son nom l'indique, est constituée par une triode (oscillatrice) et une hexode (mélangeuse) contenues dans une même ampoule et utilisant une cathode commune.

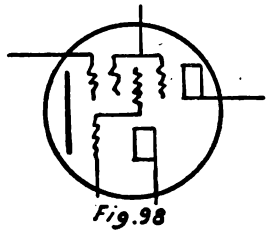


Fig. 98

— De même, le détecteur et le premier tube d'amplification B. F. sont en général réunis dans un seul tube : une duodiode-triode.

— L'étage amplificateur de puissance B. F. ou étage de sortie, comporte en général deux tubes montés en push-pull (triodes ou pentodes).

2. *AMPLIFICATION H. F.*

La plupart des récepteurs superhétérodynes comportent avant l'étage changeur de fréquence un amplificateur H. F. appelé aussi « présélecteur ».

3. *ALIMENTATION*

Nous n'avons pas représenté sur la figure 97 le système d'alimentation du poste. Signalons seulement que celle-ci est possible de plusieurs façons : soit par batteries (piles ou accumulateurs) soit par

utilisation du courant du secteur, ou bien par transformateur avec diviseur de tension (postes utilisables uniquement sur courant alternatif), ou bien par cordon chauffant (postes tous-courants). La description détaillée de ces systèmes d'alimentation sort du cadre de ce cours.

4. *DECOUPLAGE DES CIRCUITS*

Lorsque plusieurs étages ont la même source de tension plaque et écrans, il peut s'y produire des oscillations indésirables par réaction, leurs circuits se trouvant couplés entre eux par l'intermédiaire de l'impédance de la source d'alimentation.

Pour éviter de telles réactions, on monte dans les circuits des amplificateurs des « circuits de découplage » dont le rôle est de détourner la H. F. de la source d'alimentation. Ils comportent des résistances ou des bobines de self présentant une forte impédance à la fréquence du signal H. F., associées à des condensateurs qui l'écoulent à la masse.

Nous avons représenté deux de ces circuits sur la figure 97, sur les écrans des tubes amplificateurs moyenne fréquence.

5. *COMMANDE UNIQUE D'ACCORD*

Les condensateurs variables des circuits du présélecteur (éventuellement), du tube mélangeur et de l'oscillateur local sont montés en ligne sur un même axe et commandés par une manœuvre unique.

La commande unique dans le superhétérodyne est assez délicate à réaliser : il s'agit d'accorder le circuit H. F. de réception et le circuit de l'oscillateur local sur deux fréquences distinctes ayant entre elles un écart constant (égal à la M. F.) tout au long de chaque gamme de réception.

Pour établir cet écart, on adopte des bobines de self différentes pour les circuits H. F. et l'oscillateur, les condensateurs étant identiques et leur capacité variant toujours en même temps lors de la manœuvre unique. Malheureusement l'écart des fréquences ne se maintient pas rigoureusement constant pour toutes les positions des condensateurs variables : il varie aux extrémités de gammes. On y remédie en modifiant l'allure de la variation de l'accord du circuit oscillant de l'oscillateur en fonction de la position du condensateur variable. Pour cela on introduit dans ce circuit oscillant un condensateur ajustable de faible capacité monté en parallèle (trimmer) et un condensateur ajustable de capacité sensiblement plus forte monté en série (padding).

Le trimmer intervient en début de gamme aux fréquences élevées en augmentant la capacité du C. O. qui est alors très faible, et le padding agit en fin de gamme diminuant sa capacité aux basses fréquences.

6. *ALIGNEMENT DES CIRCUITS*

L'alignement des circuits d'un poste superhétérodyne consiste dans le réglage de ces paddings et trimmers dont nous venons de parler et également des trimmers montés dans les circuits moyenne fréquence qui doivent rester accordés rigoureusement sur cette fréquence ; le changement d'un fil de connexion dans un de ces circuits suffit à le désaccorder légèrement : on le réaligne en faisant varier la capacité de son trimmer.

L'alignement des circuits est très important : le défaut d'alignement d'un étage quelconque a pour effet de réduire la sensibilité et la sélectivité du récepteur.

7. *OSCILLATEUR A FREQUENCE DE BATTEMENT*

Pour la réception des ondes entretenues pures, il est utilisé une petite hétérodyne dite « oscillateur à fréquence de battement » dont la fréquence est réglée pour donner avec la moyenne fréquence un battement de fréquence audible. Il est mis éventuellement en service au moyen d'un interrupteur et est couplé au tube détecteur.

8. *COMMANDE D'AMPLIFICATION*

La commande d'amplification ou réglage du volume sonore au niveau désiré se fait en basse fréquence en général au moyen d'un potentiomètre branché directement dans le circuit du détecteur et permettant de faire varier la tension détectée envoyée à la grille du premier étage d'amplification B. F.

9. *COMMANDE AUTOMATIQUE D'AMPLIFICATION (A. V. C.)*

La commande automatique d'amplification ou dispositif antifa ding (appelée encore A.V.C. par abréviation de sa désignation en anglais :(Automatic volume control) permet d'obtenir, pour un réglage déterminé de la commande d'amplification manuelle, un volume sonore indépendant des variations d'amplitude du signal d'entrée. Elle est devenue possible grâce à l'emploi pour l'amplification H. F. et M. F. de pentodes à pente variable. Le principe en est très simple : il suffit d'obtenir dans le récepteur une source de tension qui devienne plus négative quand le signal reçu augmente d'intensité : appliquée aux grilles de commande des pentodes à pente variable, elle fera baisser leur tension de polarisation et diminuera donc l'amplification. La source de tension utilisée est la résistance du circuit du tube détecteur dont une des extrémités est d'autant plus négative que le signal détecté est plus fort. Cette tension, avant application aux tubes pentodes, passe par un filtre B. F.

10. *INDICATEURS VISUELS D'ACCORD*

Les indicateurs visuels d'accord, dont l'emploi est très généralisé, permettent d'accorder un récepteur sur l'émission désirée, après avoir placé dans la position de silence le bouton de commande d'amplification. Une fois l'accord réalisé, sans bruit et uniquement à l'œil, on règle la puissance sonore au niveau désiré. Les indicateurs visuels les plus utilisés sont les « œils magiques » ou « trèfles cathodiques ».

Le principe de leur fonctionnement est très simple.

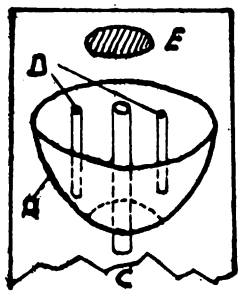


Fig. 99

Il comportent (figure 99) une cathode chaude C émettrice d'électrons et une anode A en forme de coupelle et portée à un potentiel positif ; la surface intérieure de l'anode est recouverte d'une couche de matière fluorescente devenant lumineuse sous l'action du bombardement électronique, si bien qu'en observant l'anode par le sommet du tube, on verrait sa surface uniformément lumineuse sauf en son centre où un petit écran circulaire est destiné à arrêter la lumière venant de la cathode incandescente. Mais des électrodes déviatrices D, au nombre de 2, 3 ou 4 sont disposées sur le trajet des électrons entre cathode et anode ; portées à un potentiel plus ou moins négatif, elles dévient, plus ou moins, les électrons passant à leur voisinage de leur trajectoire normale, donnant sur l'anode des secteurs d'ombres plus ou moins larges.

Le potentiel des électrodes déviatrices D est commandé par la tension AVC du régulateur antifading préalablement amplifiée par une triode (figure 100).

Au moment de l'accord précis sur une station, la tension AVC (donnée par les signaux détectés) est le plus négative : à ce moment le courant de la triode est très faible, la chute de tension dans la résistance R est insignifiante et les électrodes D se trouvent presque au même potentiel que l'anode : les électrons ne sont pas déviés de leur parcours et les secteurs d'ombre deviennent très étroits (figure 101) : on sait à ce moment que l'accord précis est réalisé.

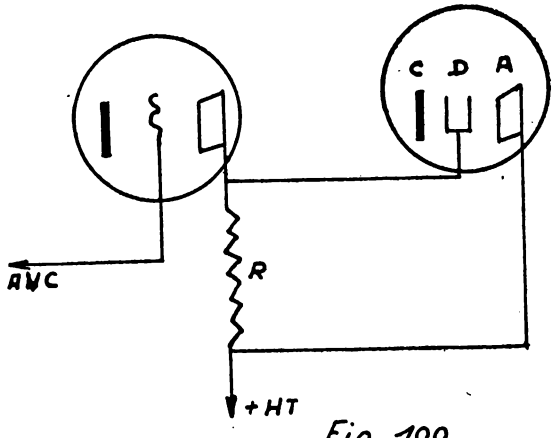


Fig. 100

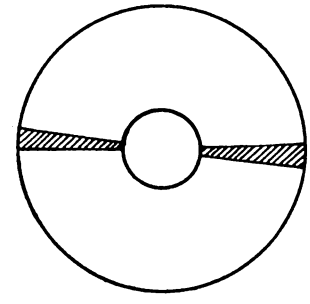


Fig 101

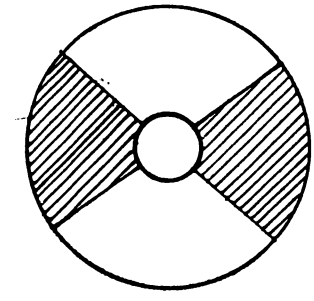


Fig. 102

Au contraire, quand l'accord du récepteur sur une station n'est pas réalisé, les secteurs d'ombre sont très larges (figure 102).

La triode amplificatrice représentée par la figure 100 est généralement montée dans le tube même de l'œil magique.

— Le récepteur superhétérodyne a fait l'objet d'autres perfectionnements présentant leurs avantages et leurs inconvénients. Mentionnons-les pour mémoire :

— Le réglage silencieux.
— La sélectivité variable.
— La contre-réaction.

CHAPITRE X

CONSTITUTION D'ENSEMBLE D'UN EMETTEUR SIMPLE

Nous avons vu au chapitre II le principe d'organisation d'un poste émetteur de radiocommunications et énuméré les différents organes qui le constituent en indiquant leurs fonctions respectives.

Ayant étudié aux chapitres suivants ces diverses fonctions et les montages correspondants, nous pouvons maintenant faire le schéma d'ensemble d'un poste émetteur simple (figure 103).

REMARQUES

1. *MAITRE-OSCILLATEUR*

La figure 103 représente comme maître-oscillateur ou pilote un oscillateur Hartley à triode. Tout autre montage oscillateur pourrait être utilisé, en particulier le maître-oscillateur à quartz (cf. figure 79).

2. *AMPLIFICATION H. F.*

Un seul étage d'amplification H. F. a été représenté. Beaucoup d'émetteurs en comportent plusieurs : le premier est appelé alors *étage séparateur* : amplifiant peu, il a surtout pour rôle d'éviter les réactions possibles, sur la stabilité du maître-oscillateur de l'antenne et de l'étage de puissance, sur lequel on fait généralement la manipulation en télégraphie.

3. *EMISSION EN TELEGRAPHIE — MANIPULATION*

Pour faire fonctionner l'émetteur en télégraphie par ondes entretenues pures, il suffit de mettre hors circuit les étages de modulation utilisés en radiotéléphonie et d'établir ou couper à volonté les courants H.F. au moyen d'un manipulateur. Les systèmes possibles de manipulation sont très nombreux.

4. *METHODES DE POLARISATION*

Tous les modes de polarisation sont utilisables dans les émetteurs. Toutefois, dans l'étage amplificateur H.F. de puissance, on n'utilise pas la polarisation par fuite de grille, car si celle-ci était coupée ou l'oscillateur en panne, le courant plaque pourrait, en l'absence de polarisation, prendre une valeur trop élevée, fondant les fusibles, grillant les résistances et détériorant le tube amplificateur. La polarisation est en général fournie par une tension empruntée à la source générale H.T. de l'émetteur par l'intermédiaire d'un diviseur de tension.

5. *NEUTRODYNAGE*

Lorsque les tubes amplificateurs H.F. sont des triodes, on utilise des circuits de « neutrodynage » dont le rôle est de neutraliser les réactions pouvant être établies entre leurs circuits d'entrée et de sortie (accordés sur la même fréquence) par leurs capacités plaque-grille : ces réactions auraient pour effet de faire fonctionner les tubes en oscillateurs, leurs oscillations venant troubler la bonne amplification de celles du pilote. Les circuits de neutrodynage transfèrent d'un circuit à l'autre d'un amplificateur un potentiel déphasé évitant l'amorçage d'oscillations.

Lorsqu'on utilise comme amplificateur H.F. des tubes tétrodes ou pentodes, il n'est plus nécessaire de neutrodyner les circuits, les grilles-écrans supprimant les capacités entre grilles de commande et plaques, mais il y a une certaine perte de puissance dans les grilles-écrans : le rendement est moins élevé.

6. *ALIMENTATION*

L'alimentation des émetteurs est assurée soit par des batteries de piles (émetteurs portatifs de petite puissance), soit à partir du courant alternatif du secteur (installations fixes), soit à partir des batteries de bord d'un véhicule (postes mobiles) par l'intermédiaire d'un convertisseur.

Dans les deux derniers cas, les diverses tensions à appliquer aux tubes de l'émetteur (plaques, écrans, polarisation, chauffage) peuvent être obtenues à partir d'un transformateur général d'alimentation à plusieurs secondaires à la sortie desquels elles sont redressées séparément, soit plus simplement à partir d'un seul secondaire donnant la haute tension qui, après redressement, fournit dans un diviseur de tension (système de résistances en série) toutes les tensions nécessaires.

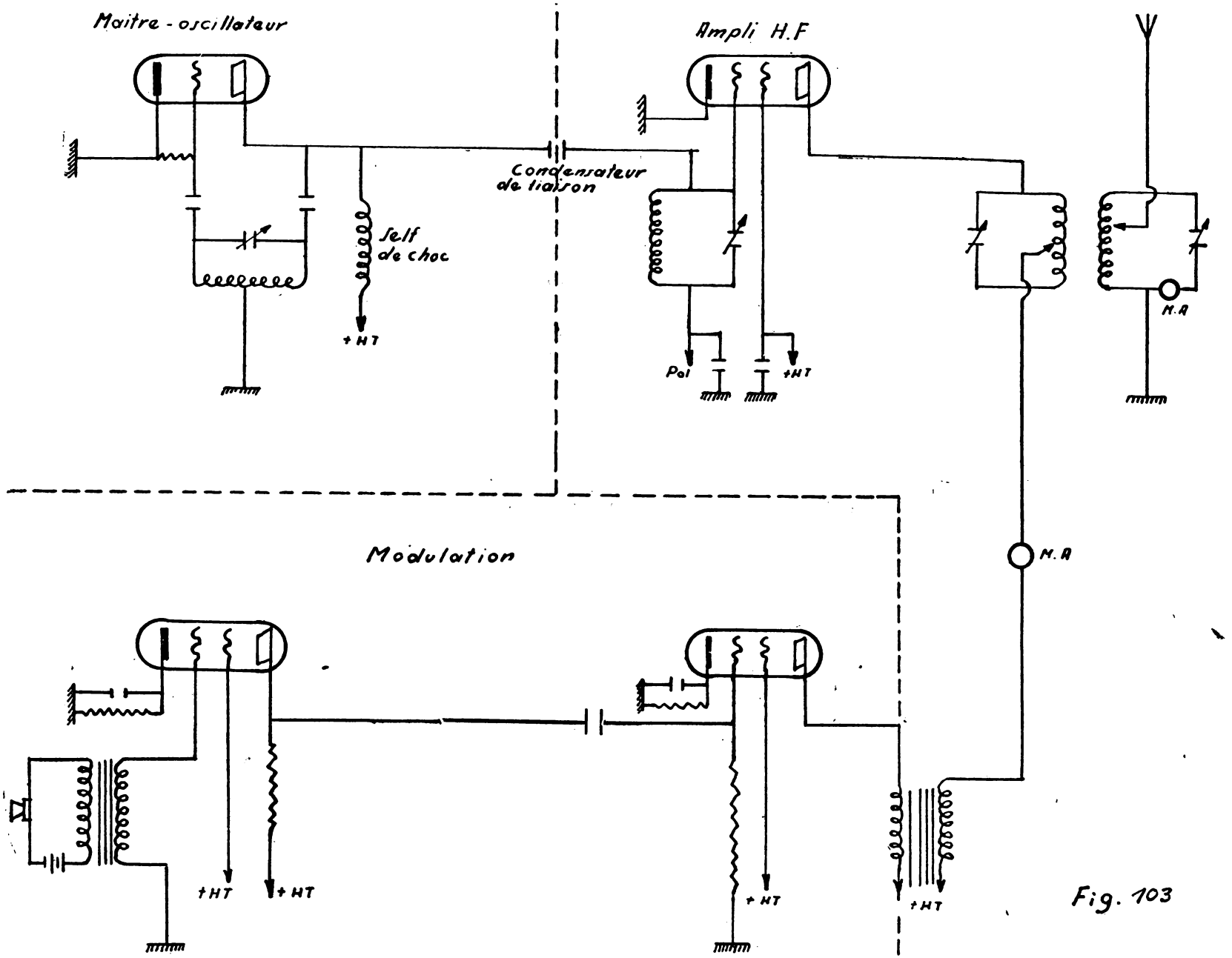

Maitre - oscillateur
Self de choc
+HT
Condensateur de liaison
Ampli H.F
Pol
+HT
M.A
M.A
Modulation
+HT
+HT
+HT
+HT

Fig. 103

NOTE BIBLIOGRAPHIQUE

A) OUVRAGES DE VULGARISATION

— La radio ?... mais c'est très simple ! par E. AISBERG
Société des Editions Radio 9, *rue Jacob PARIS* 6e.

— Eléments de radioélectricité (La T.S.F. sans mathématiques) par L. CHRETIEN
Editions E. CHIRON 40, *rue de Seine PARIS* 6e.

— Télégraphie et téléphonie sans fil par C. GUTTON
Collection « Vulgariser sans abaisser »
Editions ARMAND COLIN 103, *Bd St-Michel PARIS* 6e.

— L'électron par J. GRANIER
Collection « Que sais-je ? » — *Presses universitaires de France.*

B) RADIOELECTRICITE THEORIQUE

— Eléments de radioélectricité
Instruction technique des transmissions N° 1 (Notice technique).

— Radioélectricité générale par R. MESNY
Editions E. CHIRON 40, *rue de Seine PARIS* 6e.

— Théorie et pratique de la radioélectricité par L. CHRETIEN
Editions E. CHIRON 40, *rue de Seine PARIS* 6e.

C) THEORIES MODERNES

— Matière, électricité, radiations par M. BOLL
Bibliothèque des Chercheurs et des Curieux
Librairie DELAGRAVE 15, *rue Soufflot PARIS.*

— Physique et Microphysique par L. de BROGLIE

— Continu et discontinu en physique moderne id.

— Ondes, corpuscules, mécanique ondulatoire id.

— Matière et Lumière id.
Collection « Sciences d'aujourd'hui »
Editions ALBIN MICHEL 22, *rue Huyghens PARIS* 14e.

D) TECHNIQUE PRATIQUE

— Pratique et théorie de la T.S.F. par P. BERCHE
Editions de la Librairie de la Radio 101, *rue Réaumur PARIS.*

— La pratique radioélectrique par A. CLAIR (2 volumes)
Société des Editions Radio 9, *rue Jacob PARIS* 6e.

Atelier d'impression de l'E.S.M.I.A. N° 3032 — Tirage 5 000 exemplaires